

Ein Modellalgorithmus für die Konstruktion
ebenengebundener Verbindungswege
in einem benutzerdefinierten Raster

Helga Weber

1979

Ein Modellalgorithmus für die Konstruktion ebenenengebundener Verbindungswege in einem benutzerdefinierten Raster

**Dem Fachbereich Ingenieurwissenschaften der
Universität Erlangen-Nürnberg**

zur Erlangung des Grades

DOKTOR - INGENIEUR

vorgelegt von

Helga Weber

Erlangen 1979



Als Dissertation genehmigt von
der Technischen Fakultät der
Universität Erlangen-Nürnberg

Tag der Einreichung:	17. 7.1979
Tag der Promotion:	8.11.1979
Dekan:	Prof. Dr. H.Niemann
Berichterstatter:	Prof. Dr. D. Seitzer
	Prof. Dr. H. Müller
	Prof. Dr. H.O. Leilich

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Mathematische Maschinen und Datenverarbeitung.

Mein Dank gilt vor allem Herrn Prof. Dr.-Ing. D. Seitzer, der mir die Anfertigung der Arbeit ermöglicht hat. Ihm und Herrn Prof. Dr. H. Müller bin ich für Anregungen, Hinweise und konstruktive Kritik in den geführten Diskussionen zu Dank verpflichtet.

Herrn Prof. Dr.-Ing. H.-O. Leilich danke ich für sein Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des zweiten Korreferats.

Frau B. Knechtel und Frau A. Klingberg haben mit Geduld und Sorgfalt die Schreib- und Zeichenarbeiten durchgeführt. Ich danke ihnen dafür.

Inhalt

1.	EINLEITUNG	1
1.1	Zum Stand der Technik	1
1.2	Ziele der vorliegenden Arbeit	4
2.	ANALYSE DER AUFGABENSTELLUNG BEI DER LEITER- KONSTRUKTION	8
2.1	Aufgabenstellung	8
2.2	Menschliche Vorgehensweise	10
2.3	Vorgehensweise von Programmen	14
2.3.1	Konstruktionsraster	17
2.3.1.1	D127-Raster	17
2.3.1.2	D635-Raster	18
2.3.1.3	DU-Raster	19
2.3.2	Algorithmen zur Leiterkonstruktion und ihre Grenzen	20
3.	SYSTEMENTWURF	21
3.1	Ein abstraktes Modell für das Wegesuchproblem	21
3.1.1	Definition des $\mathcal{C}$ -Raumes	21
3.1.2	Formulierung des Wegesuchproblems im $\mathcal{C}$ -Raum	23
3.1.3	Eignung des Lee-Algorithmus für die Konstruktion ebenengebundener Verbindungen	26
3.1.4	Forderungen, die an einen Modellalgorithmus zu stellen sind	33
3.1.4.1	Wirkungsbereich von Leitungen und Durchkontak- tierungen	34
3.1.4.2	Erweiterung des Zellalphabets S	36
3.2	Skizzierung des Verfahrens	37
3.2.1	Konstruktion einer Verbindung im Entwurfsraster	37
3.2.2	Realisierung eines Weges	40
3.2.3	Konstruktionstaktik	40
3.2.4	Vergleich des Modellalgorithmus mit dem Lee- Algorithmus	42
3.3	Auswahl des Konstruktionsrasters	47

3.4	Konstruktionsregeln im Nahbereich	49
3.4.1	Nachfolgerfunktion	49
3.4.2	Gewichtsfunktion g	50
3.4.3	Zulässigkeitsfunktion f	51
3.4.4	Durchkontaktierungen zur Realisierung von Ebenenwechseln	52
4.	AUFBAU DES LEITERFINDUNGSLGORITHMUS	54
4.1	Struktur, Datenfluß und Informationsdarstellung	54
4.1.1	Geometriedatei	56
4.1.2	Rastergenerierung	56
4.1.2.1	Zell-, Raster-, Koordinatendarstellung	60
4.1.2.2	Abbildungsvorschriften	61
4.1.3	Programmkonstruktion	62
4.1.3.1	Bestimmung der Nachfolger	62
4.1.3.2	Richtungs- und Bereichsbeschränkung bei der Konstruktion	65
4.1.3.3	Prioritätensteuerung	68
4.1.4	Abbildung eines konstruierten Weges	68
5.	IMPLEMENTIERUNG	69
5.1	Raster mit konstanter Rastergitterweite	70
5.1.1	Einheitsraster	71
5.1.2	D127-Raster	74
5.1.3	D635-Raster	79
5.2	Raster mit variabler Rastergitterweite: DU- Raster	82
5.2.1	A1: Definition von Belegungszuständen	83
5.2.2	A2: Definition der Nachfolger einer Zelle	84
5.2.3	A3: Zulässigkeit des Übergangs	89
5.2.4	A4: Transformationsvorschrift	92
5.3	Überarbeitung des Entwurfs	94

6.	ERGEBNISSE	96
6.1	Abschätzung von Rechenzeit- und Speicherbedarf	98
6.2	Konstruktionsergebnis	101
6.2.1	Der Einfluß der Rasterwahl	102
6.2.2	Der Einfluß der Konstruktionstaktik	106
6.2.3	Beispiele	110
6.2.4	Interpretation der erzielten Ergebnisse	115
6.3	Schlußbemerkungen	115
7.	ANHANG	
7.1	Schrifttum	119
7.2	Leiterplattenentwürfe	
7.2.1	Bestückungsplan zu 1.08	A1
	1. Entwurf zu 1.08	A2
	2. Entwurf zu 1.08	A3
	3. Entwurf zu 1.08	A4
7.2.2	Bestückungsplan zu 1.11	A7
	1. Entwurf zu 1.11	A8
	2. Entwurf zu 1.11	A9
7.2.3	Stromlaufplan zu 4.03	A10
	Entwurf zu 4.03	A11
7.3	Entstehen eines Entwurfs	A12
7.4	Geometriedatei	A17
7.4.1	Syntax und Semantik der Geometriedatei	
7.4.2	Geometriedatei für das D127-Raster	A20
7.4.3	Geometriedatei für das DU-Raster	A21



Digitized by the Internet Archive
in 2026

0. Zusammenfassung

=====

Die vorliegende Arbeit soll ein Beitrag zur Lösung des Problems sein, eine kreuzungsfreie Leiterführung in zwei Ebenen zur Realisierung einer Verbindungsliste unter Beachtung eines Regelkatalogs automatisch zu entwerfen.

Der Konstruktionsalgorithmus basiert auf dem Lee-Algorithmus und konstruiert Verbindungen in Ebenenpaaren. Neben 2-Ebenen-Leiterplatten sind auch Mehrlagenleiterplatten mit 4 oder 6 Ebenen bearbeitbar.

Der Algorithmus unterscheidet sich von den aus der Literatur bekannten modifizierten Lee-Verfahren durch ein hohes Maß von Flexibilität und die Unabhängigkeit von den physikalischen Abmessungen von Leiterbreiten, Lötaugendurchmessern und Mindestisolationsabständen. Diese Flexibilität wird auf zwei Wegen erreicht:

1. Der Benutzer definiert in einer Geometriedatei das Entwurfsraster durch Angabe einer Nachbarschaftsfunktion, die Spezifikation erlaubter und verbotener Übergänge zwischen benachbarten Punkten des Entwurfsrasters und die Angabe zu unterscheidender Zustände, die ein Rasterpunkt annehmen kann. Der Algorithmus ist damit unabhängig vom gewählten Rastertyp.
2. Der Benutzer definiert die Konstruktionsstrategie durch Auswahl eines Satzes von Regeln aus einem parametrisierten Regelkatalog. Die Parameterwerte werden von einem Algorithmus rastertypabhängig spezifiziert. Der Algorithmus ist damit nicht an eine vordefinierte Konstruktionsmethode gebunden.

Der Konstruktionsalgorithmus setzt die Verbindungen aus elementaren Wegsegmenten im "Entwurfsraster" zusammen. Der mit den rasterspezifischen Parameterwerten modifizierte Satz von Konstruktionsregeln garantiert, daß die Abbildung einer konstruierten Verbindung in die physikalischen Ebenen immer möglich ist. Die Unterscheidung zwischen Entwurfsraster und Leiterraster bringt eine erhebliche Einsparung von Rechenzeit und Arbeitsspeicherbedarf gegenüber den Konstruktionsverfahren, bei denen eine Verbindung aus elementaren Segmenten des Leiterrasters zusammengesetzt ist.

Ein weiterer Vorzug dieses Algorithmus liegt darin, daß bei Übergang zu feineren Rastern entsprechend dem technologischen Fortschritt in der Leiterplattenfertigung nur eine Änderung der Geometriedatei nötig ist, und der Konstruktionsalgorithmus unverändert übernommen werden kann.

Summary

=====

A new algorithm for the automatic design of a connection list for a wiring in two layers without crossovers, taking into account a set of rules, is described.

The algorithm is based on the Lee algorithm and calculates the connections in pairs of levels. Multilayer boards with 4 or 6 levels can be designed as well as boards with only 2 layers.

The algorithm differs from other modified Lee algorithms described in the literature in providing a high degree of flexibility and independence from the width of the conductors, the diameter of the through-holes and the minimum spacing.

This flexibility is achieved in two ways:

1. The user defines in a file of geometric data the design grid by specifying a neighbourhood function, the allowed and forbidden transitions between neighbouring points of the design grid, and the possible states at a point. The algorithm is then independent of the type of grid chosen.
2. The user defines the design strategy by selecting a set of rules from a parameterized catalogue. The values of the parameters are specified by an algorithm, dependent on the type of grid. Thus the algorithm is not confined to a predefined method.

The construction algorithm synthesizes the connections from elementary line segments in the design grid. The set of rules, as modified by parameter values specific to the design grid, guarantees that the subsequent transformation of a connection into the physical layers is always possible.

The distinction between design grid and conductor grid leads to a substantial reduction in computing time and memory requirement, as against the single grid method in which each conductor consists of elementary segments of the conductor grid.

A further advantage is that the algorithm cannot be obsoleted by a reduction in the conductor grid mesh caused by technological advance, as this requires only alterations to the geometric data file.

1. EINLEITUNG

1.1 Zum Stand der Technik =====

Die bekannten Algorithmen zur rastergebundenen Leiterwegbestimmung beim konstruktiven Schaltungsentwurf lassen sich drei Klassen zuordnen:

- . der Klasse der punktorientierten Algorithmen -
- . der Klasse der streckenorientierten Algorithmen -
- . der Klasse der strukturorientierten Algorithmen.

Punktorientierte und streckenorientierte Algorithmen sind durch folgende Merkmale charakterisiert:

- Von zwei zu verbindenden Punkten wird einer zum Startpunkt der Verbindung erklärt, der andere zum Zielpunkt. Die Wegkonstruktion beginnt beim Startpunkt. Sie endet, wenn der Zielpunkt erreicht ist.
- Die Verbindung zwischen Startpunkt und Zielpunkt wird in aufeinanderfolgenden Konstruktionsschritten abschnittsweise konstruiert.
- In jedem Konstruktionsschritt werden bereits bestehende Teilverbindungen (eine Teilverbindung ist ein Weg, der beim Startpunkt beginnt und dessen Endpunkt nicht Zielpunkt der Verbindung ist) um ein Grundelement verlängert, falls dies möglich ist. Die Länge eines Grundelements beträgt bei punktorientierten Verfahren eine Rastergitterweite, bei streckenorientierten Verfahren ein ganzzahliges Vielfaches der Rastergitterweite.
- In jedem Konstruktionsschritt werden alle zulässigen Fortsetzungen von Teilwegen berechnet und mit ihrer Bewertung gespeichert: Teilwege können sich also in jedem Konstruktionsschritt verzweigen. Die Güte der Fortsetzung wird über eine Gewichtsfunktion bestimmt.

Im Gegensatz zu diesen systematisch arbeitenden Verfahren ist die Vorgehensweise bei strukturorientierten Verfahren heuristisch. Ausgehend von einer Struktur ('I' für Verbindungen zwischen Punkten, die in einem Koordinatenwert übereinstimmen, 'L' für Verbindungen, die eine Ecke enthalten, 'Z' für Verbindungen, die zwei Ecken enthalten) wird versucht, durch 'Dehnen' und 'Komprimieren' der Grundelemente der Struktur, die gesuchte Verbindung in vorhandene freie Rasterlinien so einzubetten, daß die Endpunkte der Struktur mit den zu verbindenden Punkten übereinstimmen. Die Verbindung wird also 'als Ganzes' konstruiert. Die erste mögliche Realisierung der gesuchten Verbindung wird i.a. auch ausgewählt [17].

Bei punktorientierten Algorithmen wird eine Verbindung als Kette von Punkten dargestellt [13,19,21]. Punkte der Kette liegen auf Schnittpunkten der Rasterlinien (Rasterpunkten) des Leiterrasters. Jedem Rasterpunkt ('Zelle') ist ein Wertepaar zugeordnet, das den Belegungszustand s und einen Verweis c enthält. c verweist auf die Vorgängerzelle. Während des Konstruktionsprozesses wird noch ein dritter Wert zu jeder Zelle gespeichert: das Zellgewicht. Das Gewicht einer Zelle x beschreibt die 'Qualität' des konstruierten Teilweges zwischen dem Startpunkt S der zu konstruierenden Verbindung und der Zelle x . Bei mehreren Verbindungsmöglichkeiten zwischen zwei Punkten wird diejenige Verbindung mit dem kleinsten Zellgewicht realisiert. Der Arbeitsspeicherbedarf ist durch die Gesamtzahl der Zellen gegeben.

Der Rechenaufwand für die Konstruktion eines Weges nimmt quadratisch mit dessen Länge zu.

Bei streckenorientierten Verfahren wird ein Leiterzug aus Strecken d.h. Rasterlinienabschnitten zusammengesetzt [20]. Die Strecken werden analog zu den punktorientierten Verfahren über ein Verweislelement verkettet. Der Aufwand für die Konstruktion einer Verbindung ist nicht mehr abhängig von der Länge der Verbindung sondern von der Anzahl der benötigten Richtungsänderungen.

Der Arbeitsspeicherbedarf wächst mit steigendem Vollständigkeitsgrad des Entwurfs: ~~er ist durch~~ die 'Belegt'-Elemente in jeder Rasterzeile bzw. Rasterspalte gegeben. Die 'Belegt'- und die 'Frei'-Elemente werden i.a. als verkettete Listen gespeichert.

Jedem Punkt einer konstruierten Verbindung ist ein elektrisches Potential zugeordnet, das im folgenden auch als 'Signal' bezeichnet wird.

Gehören zu einem Signal mehr als zwei Endpunkte, dann braucht nur die erste Verbindung als Punkt-zu-Punkt Verbindung konstruiert zu werden. Jede weitere kann als Anschluß an ein schon vorhandenes Leiterstück dieses Signals realisiert werden.

Soll mit einem streckenorientierten Algorithmus diese Anschlußtechnik zulässig sein, muß zu jeder Zelle, die einem 'Belegt'-Element angehört, auch die Signalzugehörigkeit gespeichert werden. Bei dicht belegten Leiterplatten nähert sich daher der Arbeitsspeicherbedarf dem der punktorientierten Algorithmen an. Bei strukturorientierten Verfahren, wo eine Verbindung aus Elementarstrukturen zusammengesetzt ist, hängt der Aufwand für die Konstruktion einer Verbindung von der Komplexität der verwendeten Struktur ab [16]. Der Speicheraufwand ist dem der streckenorientierten Verfahren vergleichbar: es werden die 'Belegt'-Elemente gespeichert und gegebenenfalls die Potentialzugehörigkeit. Die Erfolge sind bei dünn belegten Leiterplatten überzeugend, wo Verbindungswege zum großen Teil umweglos geführt werden können. Der Rechenbedarf ist wegen der deutlich geringeren Anzahl von Abfragen wesentlich niedriger als bei den systematischen Verfahren.

Die wesentlich niedrigeren Vollständigkeitsraten erzwingen jedoch nahezu immer eine 'Nachkonstruktion' mit einem systematischen Konstruktionsverfahren.

1.2 Ziele der vorliegenden Arbeit =====

Konstruieren heißt, ein Entwurfsproblem durch die Anwendung von Regeln zu lösen. Ein Konstrukteur verfügt auf seinem Arbeitsgebiet über einen Katalog von Regeln und Informationen, die es ihm gestatten, Routineprobleme zügig zu bearbeiten und - falls er über konstruktive Begabung verfügt - die Regeln entsprechend der gestellten Entwurfsaufgabe so zu modifizieren, daß er bei Bedarf auch bisher nicht im Regelarsenal enthaltene Restriktionen berücksichtigt, falls ihm ihr Geltungsbereich und ihre Wirkung klar beschrieben wurden. Der Erfolg, d.h. die vollständige Lösung der Entwurfsaufgabe ist bei dieser Art des Vorgehens, das eine Fülle von Such-, Erkennungs- und Entscheidungsprozeduren impliziert, naturgemäß a priori nicht sichergestellt.

Versucht man, ein Entwurfsproblem mit einem Rechner zu bearbeiten, dann ist die Programmierung eines Lösungsalgorithmus dann möglich, wenn die Regeln zur Lösung der Aufgabe vollständig sind, die Anwendungsprozedur eindeutig ist und bei der Anwendung der Regeln keine Konflikte entstehen können.

Die Nachbildung des menschlichen Vorgehens bei der Behandlung von komplexen Aufgabenstellungen, bei denen die Regeln bei Beginn des Entwurfs möglicherweise nicht vollständig bekannt sind und nicht einmal sichergestellt ist, daß eine Lösung existiert, ist im allgemeinen nicht möglich.

Selbst bei sehr ähnlichen Entwurfsaufgaben, etwa der Konstruktion von Verbindungswegen in einer, zwei oder mehr als zwei Ebenen und dem Layout von integrierten Schaltkreisen (gegeben jeweils ein Muster von geometrischen Elementen, gesucht Verbindungsstrukturen zwischen ausgewählten Elementen unter Verwendung erlaubter Grundstrukturen und Respektierung verbotener Zonen) ist ein gemeinsamer Satz von Regeln weder angebbar noch die Existenz einer Lösung sicher.

In der vorliegenden Arbeit soll gezeigt werden, daß bei konsequenter Trennung von Konstruktionsregeln, geometrischen Bedingungen (Leiterbreiten, Mindestisoliationsabständen usw.) und der Konstruktionstaktik es möglich ist, ein Leiterfindungsprogramm zu entwickeln, das in einem benutzerdefinierten Raster arbeitet. Darüberhinaus kann der Benutzer durch Auswahl und Ändern der Rangfolge der Konstruktionsregeln auch die Konstruktionstaktik ändern.

Damit können Entflechtungsprobleme auf Leiterplatten beliebigen Formats mit unterschiedlicher Bestückung, unterschiedlichen Abmessungen von Leiterbreiten und Durchkontaktierungen bearbeitet werden, wenn nur ein regelmäßiges Raster existiert, dessen Punkte (Schnittpunkte der Rasterlinien) mögliche Orte für Bausteinanschlüsse und dessen Linien mögliche Orte für Elemente von Verbindungswegen darstellen.

Sowohl in der Menge der Rasterpunkte als auch in der Menge der Rasterlinien lassen sich Muster definieren, die die Nutzung dieser Elemente einschränken (Beispiel: nur jeder zweite Rasterpunkt darf einen Bausteinanschluß aufnehmen) oder ganz verbieten (Beispiel: alle Rasterlinien und Rasterpunkte innerhalb eines durch zwei Punkte definierten Rechtecks sind frei von Durchkontaktierungen und/oder Leitungen zu halten).

Dem Anwender bietet das Programm die Möglichkeit, den Einfluß von Regeländerungen auf das Konstruktionsergebnis systematisch zu untersuchen und damit gezielte, in ihren Auswirkungen berechenbare oder zumindest abschätzbare Änderungen in der Konstruktionstaktik vorzunehmen.

Das geschieht am einfachsten durch die Auswahl einer Untermenge von Regeln und Restriktionen und die Änderung der Prioritätenreihenfolge, die bei der Anwendung der Regeln vom Konstruktionsalgorithmus berücksichtigt werden.

Damit sind im Rahmen der grundlegenden Restriktionen - wie beispielsweise der rastergebundenen Leiterführung - neue Konstruktionstaktiken simulierbar.

Die Gitterweite des Rasters, in dem das Leitungsfindungsprogramm die Verbindungen konstruiert, bestimmt wesentlich die Kosten für Entwurf und Fertigung der Leiterplatte. Andererseits legt die Gitterweite auch die Bauteilpackungsdichte fest, die bei vorgegebener Anzahl von Leiterebenen auf einer Leiterplatte erreichbar ist.

Die Konzeption des Modellalgorithmus erlaubt dem Anwender die Auswahl eines Rasters, das der vorgegebenen Packungsdichte am besten entspricht.

Um den Einsatz des Programms sowohl isoliert zur Realisierung einer Verbindungsliste, als auch für den Entwurf von Leiterplatten benutzen zu können, wurden Schnittstellen zu einem Programmsystem für den konstruktiven Entwurf von Schaltungen aus digitalen Bausteinen geschaffen. Dieses System enthält Module für die Zuordnung logischer Funktionen zu integrierten Bausteinen, für die automatische oder interaktive Platzierung von Bausteinen auf Trägerplatten, für die Generierung der Verbindungsliste, für ein Leiterfindungsprogramm und die grafische Ausgabe des Entwurfs [23, 25]. Der Modellalgorithmus hat die gleichen Schnittstellen wie dieses Leiterfindungsprogramm (Bild 1).

Zur Erhöhung der Flexibilität in der Anwendung wurde das System durch ein Dialogprogramm ergänzt, in dem Ergebnisse der automatisch arbeitenden Routinen beurteilt und gegebenenfalls modifiziert oder vollständig ersetzt werden können. Auf die automatische Platzierung von diskreten Bausteinen wurde wegen der großen Gehäusevielfalt und der unterschiedlichen und kaum standardisierten Einbauvorschriften der Bausteine verzichtet.

Diskrete Bauelemente können jedoch, zu einem 'Pseudo-Ic' mit 8, 16, 20, 22, 24 oder 40 Anschlüssen verpackt, wie ein integrierter Baustein behandelt werden.

automatisch

- 7 -

manuell

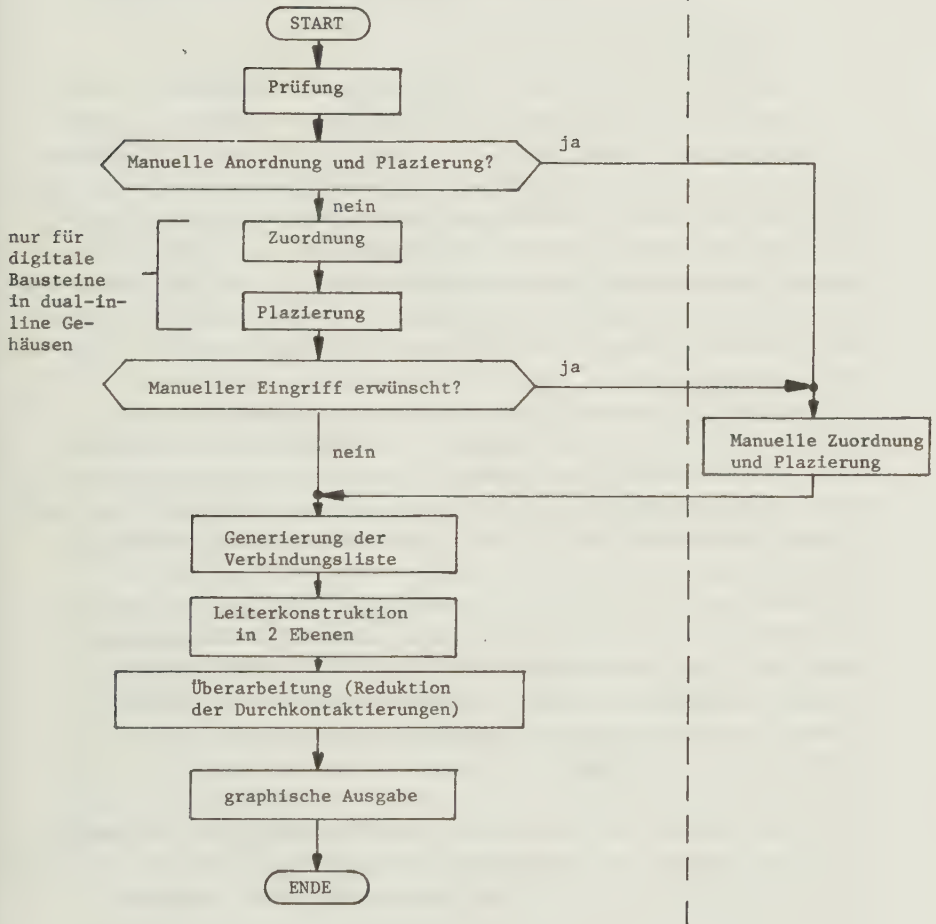


Bild 1: Konstruktionsschritte beim automatischen und inter-
aktiven LP-Entwurf

2. ANALYSE DER AUFGABENSTELLUNG BEI DER LEITERKONSTRUKTION

2.1 Aufgabenstellung =====

Der Stromlaufplan stellt die Verknüpfung der Bauelemente einer Schaltung grafisch dar. Der Bauelementtyp wird durch ein Symbol, der Anschlußstift eines Bauelements symbolisch oder durch Angabe der Pinnummer des entsprechenden Bausteintyps gekennzeichnet. Die Verbindung der Bausteinanschlüsse untereinander oder die Verbindung mit Steckerleiste oder Buchse wird durch Linien dargestellt. Anschlüsse an die Steckerleiste sind durch ein entsprechendes Symbol und - falls die Kontaktbelegung fest vorgegeben ist - durch Adresse (Steckerleistenbezeichnung, Kontaktreihe, Kontakt-nummer) gekennzeichnet.

Bei vorgegebenen Einbauplätzen für die Bausteine (das ist bei Schaltungen mit integrierten Bausteinen nahezu immer der Fall), fester Zuordnung der logischen Elemente der Schaltung zu physikalischen Bausteinen, bekannter Zuordnung der Bausteine zu Einbauplätzen, liegen die Orte aller zu verbindenden Punkte koordinatenmäßig fest.

Bei Bausteinen mit mehreren, logisch gleichwertigen Anschlüssen (z.B. Gattern) bzw. einer Steckerleiste, bei der die Signalbelegung nicht vorgeschrieben ist, ist die Signalbelegung der Kontakte zunächst noch mehrdeutig. Diese Mehrdeutigkeit wird im Zuge der Leiterkonstruktion schrittweise abgebaut.

Eine Schaltung 'entflechten' heißt:

- die geforderten Verbindungen der Bausteinanschlüsse und Steckerpunkte so auszuführen, daß keine ebenengleichen Kreuzungen mit Verbindungen, die einem andern Signal angehören, entstehen
- dabei die Leitung in der vorgeschriebenen Breite zu führen und den vorgeschriebenen Mindestabstand zu anderen Verbindungen und Durchkontaktierungen zu berücksichtigen

- alle geforderten Verbindungen auf den zur Verfügung stehenden Leiterebenen unterzubringen
- die Vertauschbarkeit logisch gleichwertiger Anschlüsse zu berücksichtigen.

Die Konstruktion der Verbindungen in mindestens zwei Leiterebenen mit aufeinander senkrecht stehenden Vorzugsrichtungen für die Leiterbahnen und Durchkontaktierungen für die Realisierung von Ebenenwechseln ist bei den hier betrachteten Schaltungstypen und Bausteinpackungsdichten (25 bis 30 integrierte Bausteine auf einer Fläche von $100 \times 160 \text{ mm}^2$) notwendig. Bei nur einer Ebene für die Leiterführung müßte der Schaltungsgraph planar sein, um sich kreuzungsfrei in die Leiterebene abbilden zu lassen.

Die Vorzugsrichtungen, die in den Ebenen gelten, werden von den konstruierten Leiterbahnen streng eingehalten bis auf 'Stichleitungen', die zu Bausteinanschlüssen führen oder 'Umleitungen', die zum Umfahren eines Hindernisses nötig sind. Die Schwierigkeit bei der Entflechtung einer Schaltung liegt darin, daß einerseits Durchkontaktierungen benötigt werden, um ebenengleiche Kreuzungen mit signalfremden Verbindungen zu vermeiden, andererseits jede Durchkontaktierung für alle anderen Leiterwege in allen Ebenen ein Hindernis darstellt, das umfahren werden muß: auch bei Mehrebenenleiterplatten wird die Verbindung zwischen zwei Ebenen i.a. durch eine metallisierte Bohrung durch alle Ebenen dargestellt. Das Umfahren eines Hindernisses verursacht aber eine Vergrößerung der Verbindungslänge und damit eine erhöhte Leiterdichte. Die zu erreichende Leiterdichte ist beschränkt. Sie ist bestimmt durch den Abstand, in dem benachbarte Leiterbahnen geführt werden können.

2.2 Menschliche Vorgehensweise

=====

Beim konstruktiven Entwurf digitaler Schaltungen werden die verschiedenen Prozesse 'Zuordnung der logischen Funktionen der Schaltung zu physikalischen Bausteinen', 'Plazierung der Bausteine' und 'Leiterkonstruktion' sequentiell ausgeführt. Vor Beginn des eigentlichen Entwurfs wird die Schaltung anhand des Stromlaufplanes analysiert, es wird eine Stückliste aufgestellt und die Struktur der Schaltung untersucht.

- gibt es besonders verbindungsintensive bzw. verbindungsarme Bausteine?
- gibt es ein- oder mehrdimensionale Bausteinfelder, die mehrfach miteinander verbunden sind?
- gibt es Signale, bei denen die Leitungslänge besonders kurz gehalten werden muß?
- wie stark ist der Stecker belegt?

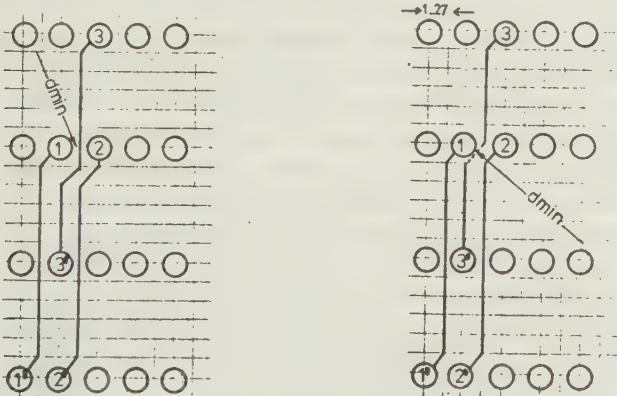
Der Vermaschungsgrad der logischen Funktionen einer Schaltung ist neben dem Typ das wichtigste Kriterium für die Zusammenfassung von logischen Funktionen zu einem physikalischen Baustein. Der Vermaschungsgrad der Bausteine ist ein wichtiges Kriterium für die Plazierung der Bausteine auf der Leiterplatte. Daneben ist aber auf eine möglichst gleichmäßige Auslastung der Leitebenen bezüglich der zu erwartenden Leiterdichte zu achten.

Nach der Zusammenfassung der logischen Funktionen der Schaltung zu Bausteinen und der Plazierung der Bausteine schließt sich wieder eine analytische Phase an:

- wie hoch ist bei der angenommenen Plazierung die zu erwartende Leiterdichte in 'kritischen' Leiterplattenbereichen, beispielsweise vor der Steckerleiste?

- wie gleichmäßig ist die Auslastung der Leiterplattenfläche bezüglich Bauelementpackungsdichte und zu erwartender Leiterdichte?

Diese Analyse der Platzierung führt dann zu Neuplatzierungen, wenn dadurch Leitungen parallel über längere Strecken geführt werden können. Die Leiter werden dann später simultan als Leiterbündel konstruiert. Das soll an einem Beispiel demonstriert werden.



a) $d_{min} = 1.27 - 1/2 - D/2$
 $d_{min} > min$

b) $d_{min} = \frac{1.27 \sqrt{2}}{2} - 1/2 - D/2$
 $d_{min} < min$

Bild 2: Leiterführungen

Rastergitterweite $g = 1.27 \text{ mm}$, Durchmesser der Durchkontaktierungen D , Leiterbreite 1 , Mindestisolationsabstand min

In Bild a) erlaubt der Leitungsverlauf $1' \rightarrow 1$ und $2' \rightarrow 2$ die Unterbringung der Verbindung $3' \rightarrow 3$ ohne Schwierigkeiten.

In Bild b) dagegen bewirkt die Leiterführung $2' \rightarrow 2$, daß die Verbindung $3' \rightarrow 3$ nur unter Verletzung des Mindestabstands zwischen Pin 1 und Pin 2 hindurchgeführt werden könnte.

Bei den hohen Pindichten digitaler Bausteine ist für die vollständige Entflechtung der Schaltung Voraussetzung, daß elementare sich wiederholende Verbindungsmuster erkannt werden und in eine geeignete geometrische Struktur übersetzt werden, da nur so der zur Verfügung stehende Platz optimal genutzt wird.

Das parallele Abarbeiten ausgewählter Verbindungen macht den menschlichen Konstrukteur jedem Programm überlegen, das die Verbindungen sequentiell konstruieren muß.

Zur Vereinfachung der Abstandskontrolle bei dicht bestückten Leiterplatten werden Leitungen auf diskreten Linien (Rasterlinien) geführt, die in einem kartesischen Koordinatensystem achsparallel bzw. unter definierten Winkeln zu den Achsen verlaufen. Der Abstand zwischen den Rasterlinien wird so dimensioniert, daß die geforderten Mindestabstände zwischen entlang benachbarten Rasterlinien geführten Leitern automatisch erfüllt sind. Dieses Raster wird im folgenden Leiterraster genannt. Der Raster-typ wird entsprechend der erwarteten Leiterdicke festgelegt. Grundsätzlich wird das Raster mit der einfachsten Struktur (Minimierung des Zeitaufwands für die Entflechtung) und der größten Gitterweite (Minimierung der Fertigungskosten) ausgewählt, in dem die Entflechtung der Schaltung realisierbar erscheint. Dem Leiterraster sind mindestens drei Punktraster zugeordnet:

BA: das Raster der Bausteinanschlüsse

SA: das Raster der Steckeranschlüsse

D: das Raster der Durchkontaktierungen

Diese Raster enthalten im Gegensatz zum Leiterraster nur Punkte bzw. Punktmuster. Diese drei Raster sind dem Leiterraster so überlagert, daß Punkte, die Durchkontaktierungen, Bausteinanschlüsse oder Steckeranschlüsse enthalten, mit Rasterlinienschnittpunkten zusammenfallen.

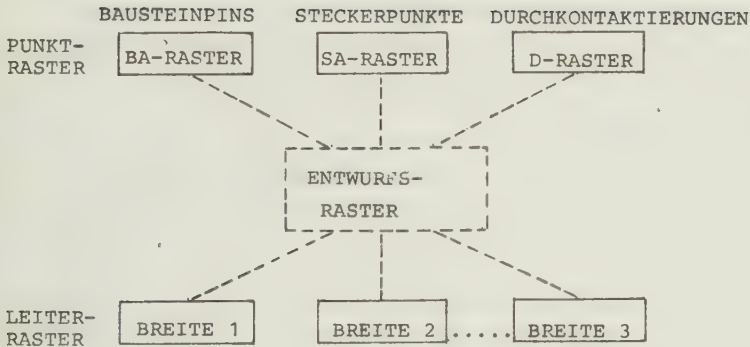


Bild 3: Überlagerung von Rastern beim Leiterplattenentwurf

Die Wirkung einer Durchkontaktierung oder eines Bausteinanschlusses bei Punkt P ist durch die Abmessungen der jeweiligen Lötungen definiert. Im allgemeinen werden die Gitterweiten so gewählt, daß nur die P zugeordneten Punkte im L-Raster oder D-Raster von einer Durchkontaktierung bei P betroffen sind, d.h. es existiert keine Auswirkung auf benachbarte Rasterpunkte bzw. Rasterlinien. Es gibt jedoch auch Rastertypen, bei denen Durchkontaktierungen und Bausteinanschlüssen Wirkungsbereiche zugeordnet werden müssen, da ihre Lötungen mehrere Rasterpunkte überlappen (vgl. 2.3.1.2 D635-Raster). Die Gitterweiten im D-Raster und BA-Raster sind als ganzzahliges Vielfaches der Leiterrastergitterweite anzunehmen. Bei Schaltungen mit Leitungen unterschiedlicher Abmessungen gibt es auch mehrere Leiterraster mit Gitterweiten, die ein ganzzahliges Vielfaches der Grundgitterweite betragen. Die Regeln, nach denen Verbindungen in diese Raster einzubetten sind, sind rastertypabhängig.

2.3 Vorgehensweise von Programmen

=====

Die Entflechtung der Schaltung enthält, wie in 2.2 erläutert, analytische und kreative Komponenten. Die Analyse der Schaltung kann in einem Programm dann nachgebildet werden, wenn die Kriterien für die Analyse formelmäßig angebar und bewertbar sind. Mit den heute bekannten Beschreibungselementen ist das jedoch immer nur für ein begrenztes geometrisches Gebiet, etwa die Umgebung eines Leiters oder eines Bausteins oder für eine spezielle Eigenschaft, wie z.B. die Belegungsdichte möglich. Eine Strukturanalyse etwa mit Methoden der Bildverarbeitung wäre zwar grundsätzlich möglich, da aber aus der logischen Struktur der Schaltung nicht direkt die Struktur der physikalischen Darstellung auf der Leiterplatte abgeleitet werden kann, aufwendig und nicht sehr aussagekräftig.

Noch schwieriger ist die Nachbildung der kreativen Aktionen des Menschen in einem Programm. Ein Konstrukteur arbeitet zwar implizit auch mit einem beschränkten Regelkatalog, aber die Auswahl der aktuell anzuwendenden Regeln und ihre Bewertung wird fallspezifisch modifiziert.

Es sind zahlreiche Verfahren zur Konstruktion einer ebenen- gebundenen Verbindung zwischen zwei Punkten nach der grundlegenden Arbeit von Lee im Jahr 1964 [19] angegeben worden. Die Verbindungs- wege werden dabei als Verkettung von Punkten (punktorientierte Verfahren), Strecken (streckenorientierte Verfahren) oder Grundstrukturen (strukturorientierte Verfahren) interpretiert. Allen Verfahren gemeinsam ist das sequentielle Abarbeiten einer Verbindungsliste und die Schwäche, daß die Verfahren fest an einen vorgegebenen Rastertyp gebunden sind. Das schränkt die Anwend- barkeit der Programme ein und macht beim Übergang auf neue Fer- tigungstechniken, die neue Rastertypen zulassen, eine Neuprogram- mierung notwendig.

Das sequentielle Abarbeiten der Verbindungsliste hat den Nach- teil, daß sich das Programm beim Entwurf einer neuen Verbindung nur an bereits konstruierten Leiterbahnen orientieren kann, nicht aber an den in diesem Bereich noch zu konstruierenden. Den Effekt dieser Vorgehensweise soll Bild 4 veranschaulichen.

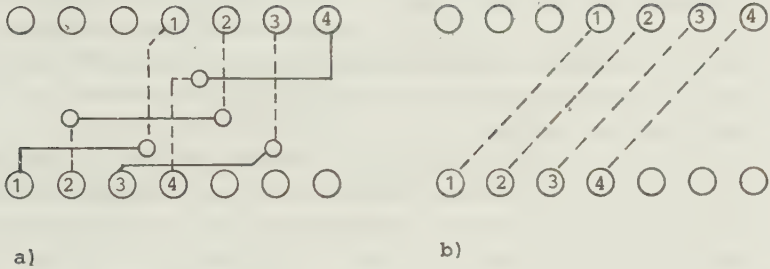


Bild 4: Vergleich von manuell und automatisch erzeugten Leiterstrukturen.

a) Automatischer Entwurf:

Die geometrische Ähnlichkeit der Verbindungen $1 \rightarrow 1$, $2 \rightarrow 2$, $3 \rightarrow 3$, $4 \rightarrow 4$ wird nicht erkannt. Fünf Durchkontaktierungen werden zur Realisierung der Leitung benötigt.

b) Handentwurf:

Die ähnliche Struktur wird erkannt und in eine geeignete Darstellung im Leiterraster übersetzt. Durchkontaktierungen werden nicht benötigt.

Verbindungswege werden in Programmen nicht als Ganzes konstruiert sondern iterativ aus Grundelementen zusammengesetzt, wobei je nach Verfahren die Grundelemente Punkte, Vektoren oder einfache Strukturen sind. Eine Verbindung aus n Grundelementen benötigt also bis zur Fertigstellung mindestens n Konstruktionsschritte. Bei punktorientierten Verfahren, die im Leiterraster arbeiten wie das Lee-Verfahren, resultieren daraus bei größeren Leiterplattenformaten Rechenzeit- und Arbeitsspeichieranforderungen, die physikalisch kaum mehr erfüllbar sind.

In der Taktik, nach der bereits konstruierte Teilwege in jedem Konstruktionsschritt um ein Grundelement verlängert werden, unterscheiden sich die Leiterfindungsalgorithmen. Bei den meisten Algorithmen [19], [21] besteht die Konstruktionsvorschrift aus Abfragen und der entsprechenden Anwendung von Regeln, die sicherstellen, daß das Fortsetzungselement im Leiterraster Platz hat.

Einen anderen Weg hat Hightower [9] vorgeschlagen. Er betrachtet bei der Fortsetzung einer Verbindung nur die Kapazität der zu durchlaufenden Zone und untersucht nicht, ob die Verbindung später auch realisierbar ist. Das kann zu einer Reihe keineswegs trivialer Konflikte bei der Einbettung einer konstruierten Verbindung in das Raster führen, da die Leiter innerhalb einer Ebene kreuzungsfrei geführt werden müssen und Durchkontaktierungen nicht überall möglich sind.

Neben systematischen Verfahren, bei denen bei jeder Iteration über eine Kostenfunktion eine optimale Fortsetzung einer Teilverbindung gefunden wird, gibt es eine Vielzahl von heuristischen Verfahren, die als Grundelement einfache Strukturen verwenden und die bei der Fortsetzung einer Teilverbindung die erste zulässige Struktur wählen.

Ein Vergleich zwischen mit Programmen erzielten und im Handentwurf erreichten Konstruktionsergebnissen zeigt: Konstruktionsalgorithmen sind nicht so leistungsfähig wie ein menschlicher Konstrukteur, dafür aber verlässlicher. Das wird besonders bei komplexen Schaltungen deutlich, wo einerseits nahezu jeder Handentwurf zunächst Fehler enthält, andererseits die Schaltung von einem Programm nicht vollständig entflochten werden kann. Typische Einschränkungen, die für Algorithmen gelten, sollen hier nochmals zusammengefaßt werden:

- A: eine Verbindung zwischen zwei Punkten wird als Folge von zuvor definierten verketteten Grundelementen dargestellt -
- B: der Algorithmus arbeitet in einem festen Raster mit einer konstanten Anzahl von Regeln, die eine feste Rangreihenfolge haben -

C: eine simultane Bearbeitung mehrerer Leitungen ist nicht möglich. Dadurch können Verbindungsstrukturen, selbst wenn sie erkannt würden, nicht adäquat verarbeitet werden.

In Kapitel 3 wird gezeigt werden, wie die unter B angegebene Beschränkung weitgehend aufgehoben werden kann. Zuvor jedoch sollen die im automatischen und Handentwurf üblichen Rastertypen vorgestellt werden, die alle auf der Grundgitterweite 2.54 mm, dem genormten Abstand der Bausteinpins, basieren.

2.3.1 Konstruktionsraster =====

Bei allen Konstruktionsrastern ergeben sich die Abstände zwischen den Rasterlinien aus den Abmessungen der Leiter und der Durchkontaktierungen.

Es werden folgende Abkürzungen verwendet:

LE	Leiterelement
RE	Rastereinheit im Leiterraster
DK	Durchkontaktierung
BA	Bausteinanschluß
SA	Steckeranschluß
l	Leiterbreite
min	Mindestisolationsabstand zwischen benachbarten Grundelementen

2.3.1.1 D127-Raster

Leiterbreite:	0.3 mm (0.6 mm, 0.9 mm)
Mindestisolationsabstand:	0.3 mm
Lötaugendurchmesser:	1.0 mm bis 1.2 mm
Bausteinrasteräquivalent:	2 RE = 2.54 mm

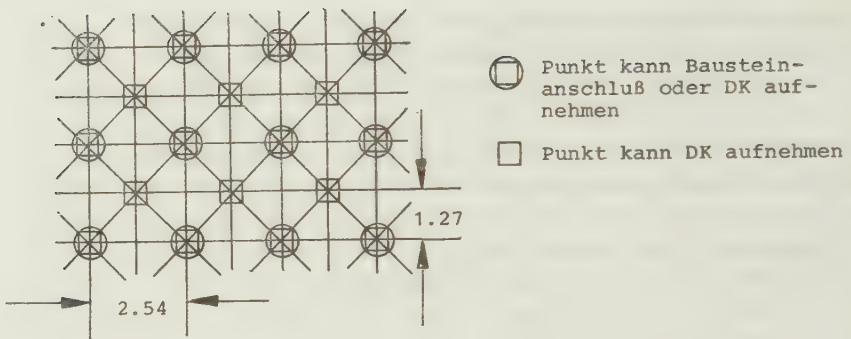


Bild 5: Rasterstruktur im D127-Raster

Mit einer Leiterraster-Gitterweite von 1.27 mm ist die Einhaltung der Mindestabstände zwischen einem Leiter und der nächst gelegenen Durchkontaktierung bzw. dem nächsten Leiter automatisch erfüllt.

2.3.1.2 D635-Raster

Die Bedingungen für Leiterbreiten, Mindestabstände und Lötangendurchmesser sind die gleichen wie beim D127-Raster. Das Baustein-rasteräquivalent beträgt 4 RE. Die gegenüber dem D127-Raster halbierte Rasterweite des Leiterrasters ergibt eine höhere Packungsdichte für Leitungen, andererseits überlappt der Wirkungsbereich von Durchkontaktierungen und Bausteinanschlüssen mehrere Rasterpunkte, so daß bei der Konstruktion einer Leitung 'Bereiche' statt 'Punkte' auf ihren Belegungstatus abgefragt werden müssen, um Konflikte bei der Abbildung eines konstruierten Weges in die betroffenen Raster zu vermeiden.

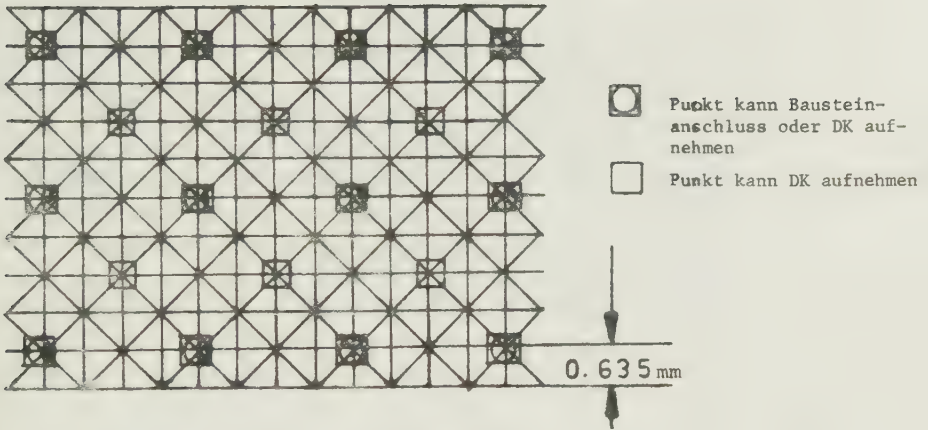


Bild 6: Rasterstruktur im D635-Raster

Eine Modifikation dieses Rastertyps ergibt sich bei Reduktion der Leiterbreiten und Mindestisolationsabstände auf 0.2 mm. Der Wirkungsbereich einer Durchkontaktierung wird in diesem Fall auf die der Durchkontaktierung zugeordnete Zelle reduziert. Das erlaubt eine höhere Leiterdichte (vgl. 4.1.2). Die Rasterlinien verlaufen dann aber nicht mehr äquidistant.

2.3.1.3 DU-Raster

Die Bedingungen für Leiterbreiten und Mindestabstände sind analog 2.3.1.1 und 2.3.1.2. Lötungen für Bausteinanschlüsse, Steckeranschlußpunkte und Durchkontaktierungen dürfen den Durchmesser 1.0 nicht überschreiten. Die Rasterlinien im Leiter-raster verlaufen nicht äquidistant, so daß der Mindestabstand zwischen einer Durchkontaktierung und einer benachbarten Verbindung automatisch erfüllt ist. Bei Übergang auf $l = \min = 0.25 \text{ mm}$ können Lötungen mit Durchmessern bis 1.28 mm zugelassen werden.

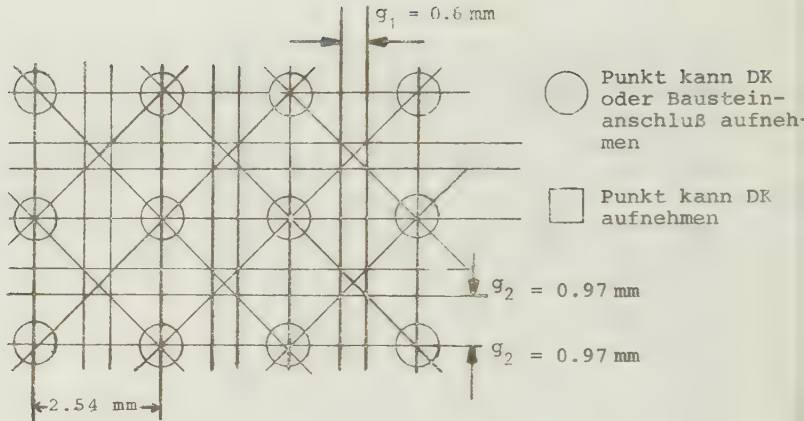


Bild 7: Rasterstruktur im DU-Raster

Dem Konstrukteur genügt die Angabe der Abmessungen von Leitern und Lötaugendurchmessern, um das passende Entwurfsraster, einschließlich der erlaubten Richtungen für die Leitungen festzulegen und die Schaltung in diesem Raster zu entwerfen. In den nächsten Abschnitten soll gezeigt werden, daß man bei Trennung von taktikbedingten und geometriebedingten Regeln und einer geeigneten Definition von Entwurfsrastern dies auch mit einem Algorithmus erreichen kann.

2.3.2 Algorithmen zur Leiterkonstruktion und ihre Grenzen

=====

Algorithmen, die mit einem Regelkatalog arbeiten, müssen um Konflikte zu vermeiden, eine Prioritätenreihenfolge für die Anwendung der Regeln kennen. Das engt die Möglichkeiten des automatischen Entwurfs gegenüber dem manuellen Entwurf ein, da der Konstrukteur sich eine Reihe von Regeln für den 'Ausnahmefall' definieren kann, wobei er den 'Ausnahmefall' während des Entwerfens, falls notwendig, neu definieren kann.

Die lokale Gültigkeit der Ausnahmeregeln kann sowohl an einen bestimmten Bereich auf der Leiterplatte, z.B. vor der Steckerleiste, als auch an eine Eigenschaft der Schaltung, z.B. an das Auftreten einer bestimmten Sollverbindungsstruktur gekoppelt sein. Da bisher keine Beschreibungselemente für die Analyse und Bewertung von Schaltungsstrukturen bekannt sind, ist diese Vorgehensweise auch nicht programmierbar. In einem beschränkten geometrischen Bereich anwendbare Regeln sind zwar programmierbar, verlangsamen aber die Bearbeitung aller Verbindungen. In Kapitel 3 wird gezeigt, wie durch einen modifizierbaren Regelkatalog und ein benutzerdefiniertes Raster eine teilweise Anpassung der Arbeitsweise des Konstruktionsalgorithmus an das vorliegende Entwurfsproblem erreicht wird.

3. SYSTEMENTWURF

Die Wirkungsweise des Algorithmus soll an einem abstrakten Modell für das Wegesuchproblem erläutert werden.

Dieses Modell wurde von Lee [19] angegeben. Lee hat in seiner grundlegenden Arbeit auch einen Algorithmus angegeben, der das Problem der Konstruktion eines kürzesten Weges zwischen zwei beliebigen Punkten löst. Es wird gezeigt, wie einerseits durch Erweiterung des Modells, andererseits durch Verallgemeinerung des Algorithmus sich im konstruktiven Schaltungsentwurf Ergebnisse erzielen lassen, die denen beim manuellen Entwurf erreichbaren wesentlich näher kommen als die in [19] angegebenen.

3.1 Ein abstraktes Modell für das Wegesuchproblem =====

3.1.1 Definition des $\mathcal{G}$ -Raumes =====

Gegeben sei ein Muster aus Punkten und Linien. Gesucht ist der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten unter Berücksichtigung der Einschränkungen, die das Muster setzt: ein Weg kann beispielsweise nur entlang von Linien geführt werden, die noch nicht anderen Wegen zugeordnet sind.

Lee beschreibt sein Modell mit Hilfe eines Raumes, der während der Konstruktion eines Weges ("search procedure") statisch ist. Nach der Konstruktion eines Weges werden die betroffenen Elemente ermittelt und verändert ("trace procedure").

Die Schnittpunkte der Rasterlinien nennt er "Zellen". Diese Zellen bilden die Menge C . Der Startpunkt einer Verbindung und der Zielpunkt einer Verbindung sowie alle Zwischenpunkte müssen Elemente von C sein. Zellen können bestimmte Zustände aus einer Menge S annehmen. Der Zustand einer Zelle wird durch eine Abbildung $f: C \rightarrow S$ definiert.

Jede Zelle besitzt genau n direkte Nachbarn: die 1-Nachbarn. Die symmetrische Relation $1N \subset C \times C$ ist die Nachbarschaftsrelation. Betrachtet man zu einer Zelle $c \in C$ diejenigen Elemente, die zu c in der $1N$ -Relation stehen, so erhält man eine Menge $N(c)$ mit Elementen, die man indizieren kann. Die Reihenfolge der Elemente in $N(c)$ bestimmt die relative Lage der Zellen c und $n_i \in N(c)$. Aus der Nachbarschaftsrelation läßt sich der Begriff eines Weges zwischen zwei Zellen a und b ableiten: Ein Weg $p(a,b)$ ist eine Folge von Zellen mit a als erstem Element (Startpunkt) und b als letztem Element (Zielpunkt), in der zwei aufeinanderfolgende Elemente unmittelbare Nachbarn sind, d.h. in $1N$ -Relation stehen.

$$p(a,b) = \langle c_0=a, c_1, \dots, c_r=b \rangle.$$

Wegen der Symmetrie der Relation ist auch

$$p(b,a) = \langle c_r=b, c_{r-1}, \dots, c_0=a \rangle$$

ein Weg in C .

Nicht alle nach dieser Vorschrift gebildeten Wege sind auch zulässig. Es wird eine Funktion M eingeführt, die für alle Wege in C eine Aussage macht, ob sie zulässig sind.

Formal ist ein $\mathcal{V}$ -Raum also definiert durch das Quintupel (C, S, N, f, M) wobei

$C = \{c\}$ die Menge der Zellen
 $S = \{s\}$ die Menge der Zustände einer Zelle

z.B.: $S = \{\uparrow, \downarrow, \rightarrow, \leftarrow, -, +\}$

$\uparrow, \downarrow$ Zelle mit senkrechtem Wegelement belegt

$\rightarrow, \leftarrow$ Zelle mit waagrechtem Wegelement belegt

$-$ Zelle ist unbelegt

$+$ Zelle ist mit waagrechtem und senkrechtem Wegelement belegt

$N|C \rightarrow \mathcal{P}(C)$ mit $N(c) = \{n | (n,c) \in 1N\}$

$\Gamma|C \rightarrow S$ mit $\Gamma(c) = s$

und

$M|P \rightarrow \{0,1\}$, mit P der Menge aller Wege in C

und $M(p(a,b)) = \begin{cases} 1 & p(a,b) \text{ ist zulässig} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$

P^* bezeichnet die Menge aller zulässigen Wege:

$P^* = M^{-1}[\{1\}]$.

3.1.2 Formulierung des Wegesuchproblems im $\mathcal{W}$ -Raum

Aufgabenstellung:

Gegeben seien zwei Punkte a und b . Es sind alle zulässigen Wege zwischen Punkt a und Punkt b zu konstruieren. P^* bezeichne nun die Menge aller zulässigen Wege zwischen a und b . Aus P^* ist ein Weg auszuwählen, der minimal bezüglich einer Funktion $G = (g_1, \dots, g_r)$ ist. Die Menge P^* wird im folgenden als die Menge der virtuellen Wege bezeichnet, der ausgezeichnete Weg p^* mit $G(p^*) = \min$ als minimaler Weg.

Die Funktion

$$G: P^* \rightarrow \underbrace{N_0 \times N_0 \dots N_0}_r = N_0^r$$

soll folgende Eigenschaften haben:

Ist $p(a,b)$ Teilweg von $p(a,c)$ so folgt:

$$G(p(a,b)) \leq G(p(a,c))$$

Die "kleiner" Relation ist dabei folgendermaßen definiert:

Sei $(m_1, m_2, \dots, m_r)$ der Wert $G(p_1)$ und $(m_1', m_2', \dots, m_r')$ der Wert $G(p_2)$. Dann ist $G(p_1) < G(p_2)$ wenn es ein j mit $1 \leq j \leq r \wedge \forall i (1 \leq i < j \rightarrow m_i = m_i') \wedge m_j < m_j'$ gibt.

Das Prinzip des Algorithmus soll im folgenden knapp erläutert werden. Lee zeigt in [19], daß sein Algorithmus den minimalen Weg liefert unter der Voraussetzung, daß G im obigen Sinne monoton ist. Das entspricht, wie später gezeigt wird, jedoch nicht den Voraussetzungen, die beim Entwurf von Verbindungswegen auf einer Leiterplatte gelten, so daß die Beweisführung hier auch nicht nachvollzogen wird.

Formulierung des Algorithmus

Zur Formulierung des Algorithmus wird noch eine Funktion d "Verweisfunktion" eingeführt mit folgender Definition:

$$d(c) = \begin{cases} -1 & \text{es gibt keinen Teilweg } t \text{ mit } c \in t \\ 0 & c = \text{Startpunkt des Weges} \\ k & c \in TW, \text{ es gibt einen Teilweg } t \text{ mit } c \in t; c \text{ ist der } k\text{-te Nachbar seines Vorgängers in } t \end{cases}$$

wobei TW die Menge aller Wege bezeichnet, die im Hinblick auf die gesuchten Verbindungen p^* zum aktuellen Zeitpunkt bereits konstruiert wurden. Der Algorithmus sorgt dafür, daß die Funktion d eindeutig ist. Bei Beginn der Konstruktion haben alle Zellen bis auf den Startpunkt den Wert $d(c) = -1$.

Der Startpunkt einer Verbindung wird im folgenden mit S, der Zielpunkt einer Verbindung mit Z bezeichnet.

Der Algorithmus zur Konstruktion einer Verbindung zwischen S und Z besteht aus vier Teilen. Er benützt zwei Listen L und L1 zur Zwischenspeicherung von Zellpunkten. Mit $G(S,c)$ wird der Wert von G bei Erreichen von Zelle c bezeichnet. $G(S,c)$ ist als ein Maß für die Güte des Weges $p(S,c)$ zu verstehen.

R1: Initialisierung

$S \rightarrow L$; $G(S,S) = (0,0,\dots,0)$; $d(S)=0$; $L1=0$

R2: Bestimmung von G'

Für alle $l \in L$ wird die Folge der Nachbarn bestimmt:

$$N(l) = \langle n_1, n_2, \dots, n_m \rangle$$

und der L1 Liste zugefügt, falls sie zulässige (M-Funktion) Nachfolger von l sind. Für jedes Element aus L1 wird ein 'vorläufiges' Zellgewicht G' und ein 'vorläufiger' Richtungscode D' berechnet. Dazu werden die Nachbarn $N(c), c \in L1$ mit bereits definiertem Zellgewicht bestimmt und diejenige Zelle $c^* \in N(c)$ ausgewählt, für die $G' = g(S, c^*) + g(c^*, c)$ minimal wird.

G' wird als vorläufiges Zellgewicht einer Zelle bezeichnet. Nach Durchführung dieser Prozedur für alle Elemente aus L1 wird den Elementen mit minimalem G' dieser Wert als endgültiges Gewicht zugeordnet und D' als Verweis auf den jeweiligen Vorgänger c* eingetragen.

R3: Auswahlregel

Mit der Funktion G wird geprüft, wie der Übergang $c \rightarrow n$, $n \in N(c)$ zu bewerten ist.

R4: Update der L-Liste und der L1-Liste

Alle Elemente der L1-Liste mit $G(S,c) \geq 0$ werden der L-Liste zugefügt. Diejenigen Elemente der L-Liste, deren sämtlichen Nachbarn bereits ein Gewicht zugewiesen wurde, werden aus der L-Liste entfernt.

3.1.3 Eignung des Lee Algorithmus für die Konstruktion ebenen-
gebundener Verbindungen

=====

Der Lee Algorithmus ist zur Lösung jedes ebenengebundenen Wegesuchproblems in einem homogenen Raster geeignet, in dem die Fortsetzung eines Teilweges von Zelle c aus nur vom Zellstatus von c und des Nachfolgers $n \in N(c)$ abhängt.

Bei Lee's vorgeschlagener Implementierung des Algorithmus als Wegesuchprozedur im Leiterplatten Layout (Flußdiagramme Bild 8a-8d) wird von festen Vorzugsrichtungen in den zur Verfügung stehenden Ebenen und der Annahme ausgegangen, daß Ebenenwechsel an beliebigen Stellen im Raster vorgenommen werden können. Das impliziert, daß während der Konstruktion Durchkontaktierungen derselbe Platzbedarf wie Leitungen zugeordnet wird. Bezüglich der Belegung einer Zelle in einer Ebene werden zwei Zustände unterschieden:

$s = 0 \rightarrow$ Zelle ist unbelegt

$s = 1 \rightarrow$ Zelle ist belegt

Die Bewertungsfunktion G hat nur eine Komponente: $g(S,c)$ gibt die Länge des virtuellen Weges bei Erreichen der Zelle c an. Die Anzahl der Nachbarn einer Zelle ist 4.

In den Folgejahren wurden eine Reihe von Implementierungen publiziert, die durch eine aufwendigere Listenverwaltung die Effizienz des Algorithmus wesentlich gesteigert haben (weniger Arbeitsspeicherbedarf und kürzere Programmlaufzeiten): eine Übersicht ist in [13] zu finden.

Nachteile, deren Wurzel schon in der Modellbildung liegen, wurden jedoch in den bekannten Veröffentlichungen nicht bereinigt.

- A: die Festlegung der Nachbarschaftsfunktion N und damit die Bindung an ein spezielles Raster -
- B: die Einbeziehung der Auswahlprozedur in den Algorithmus und damit eine feste Kopplung des Algorithmus an eine Konstruktions-taktik -
- C: Das 'blinde' Suchen in allen Richtungen vom jeweiligen 'Startpunkt' aus (das ist zwar sinnvoll beim Suchen eines Weges in einem Labyrinth aber sicherlich nicht bei der Auslegung von

Leiterbahnen, wo die Wege im wesentlichen umweglos geführt werden müssen, weil sonst die Entflechtung der Schaltung auf dem zur Verfügung stehenden Platz i.a. nicht möglich ist). 'Startpunkte' sind in diesem Zusammenhang die Elemente der L-Liste. -

D: die Vernachlässigung von höheren Nachbarschaftsrelationen bei der Bewertung der Übergänge:

Lee-Annahme:

$$g(S, c_{i+1}) = g(S, c_i) + g(c_i, c_{i+1}) -$$

E: die festen Zuordnungen:

Rastergitterweite $\hat{=}$ Mindestabstand der Mittellinien benachbarter Leitungen -

Rasterlinie $\hat{=}$ Mittellinie eines Leiters -

Rasterlinienschnittpunkt $\hat{=}$ Mittelpunkt einer Durchkontaktierung bzw. eines Bausteinanschlusses -

F: die Konstruktion von Wegen als Punkt-zu-Punkt Verbindungen.

Zur Vereinfachung der Schreibweise und im Hinblick auf die Implementierung wird in den Flußdiagrammen in Bild 8 statt $g(s, c)$ nur $g(c)$ geschrieben. Der Gewichtszuwachs beim Übergang $c \rightarrow n$, $n \in N(c)$ wird mit Δ bezeichnet.

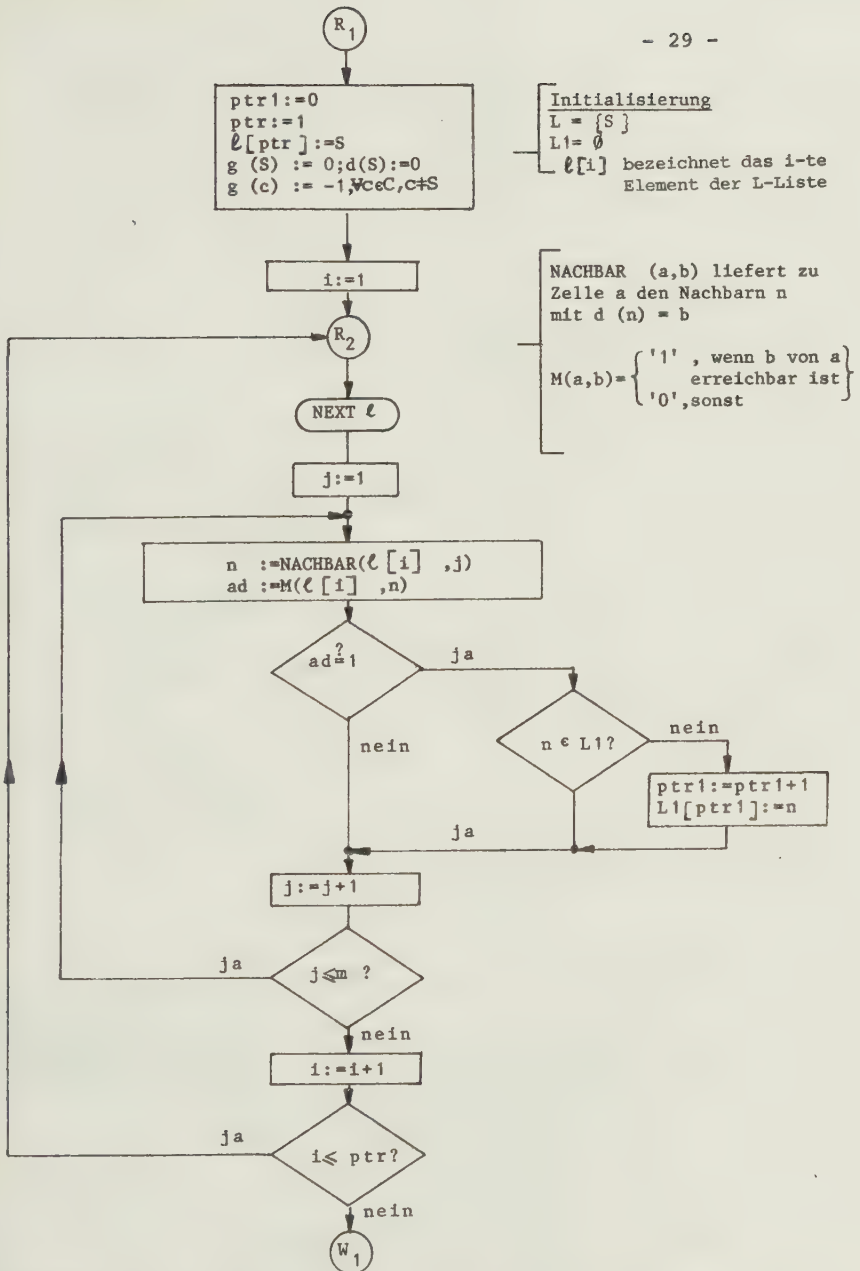


Bild 8a: Lee-Algorithmus:

Initialisierung und Füllen der L1-Liste. m ist die Anzahl der Nachbarn einer Zelle. g(c) ist der Wert der Gewichtsfunktion bei Erreichen von Zelle c auf dem Weg p(S,c).

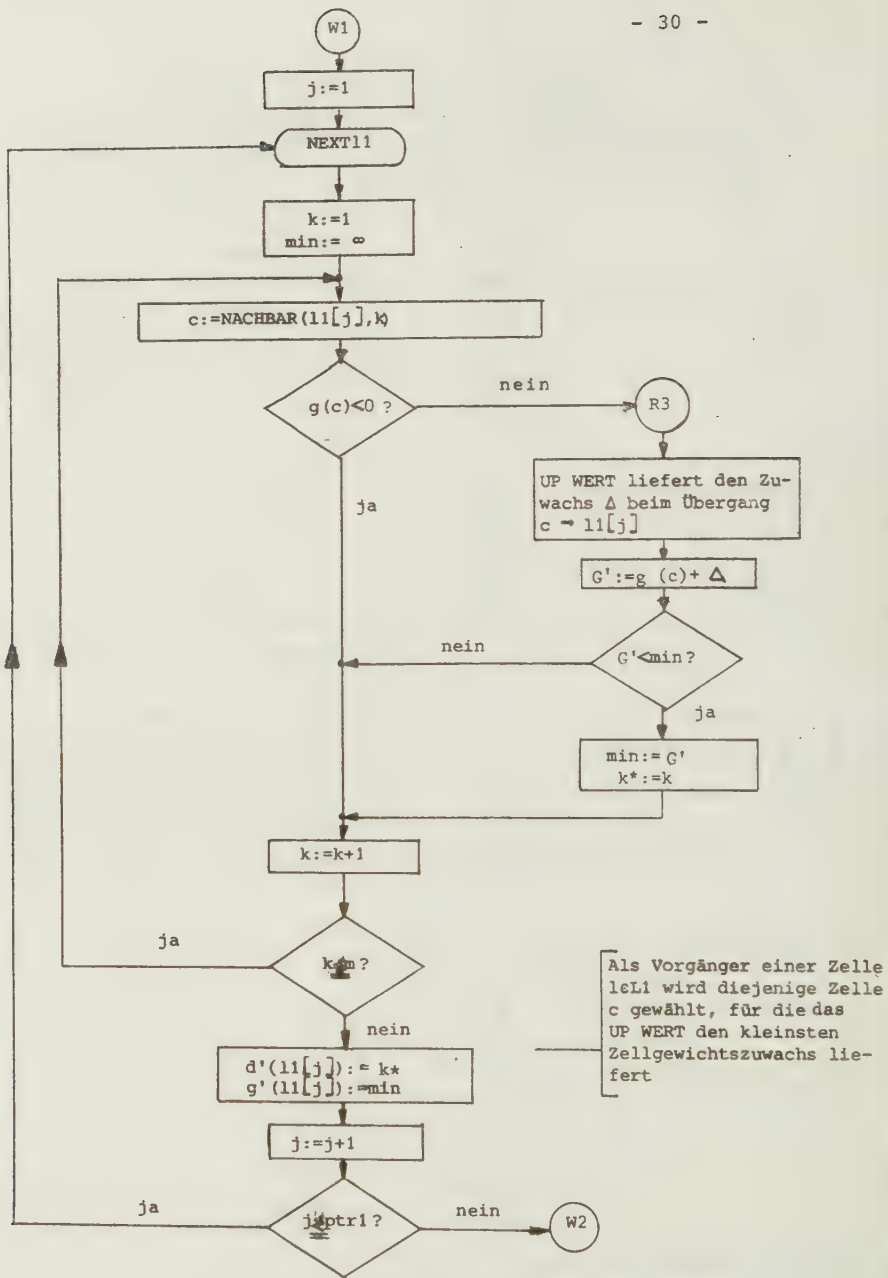


Bild 8b: Lee-Algorithmus

Zuordnen eines vorläufigen Zellgewichts G' allen $c \in L1$.

k^* verweist auf den vorläufigen Vorgänger von c .

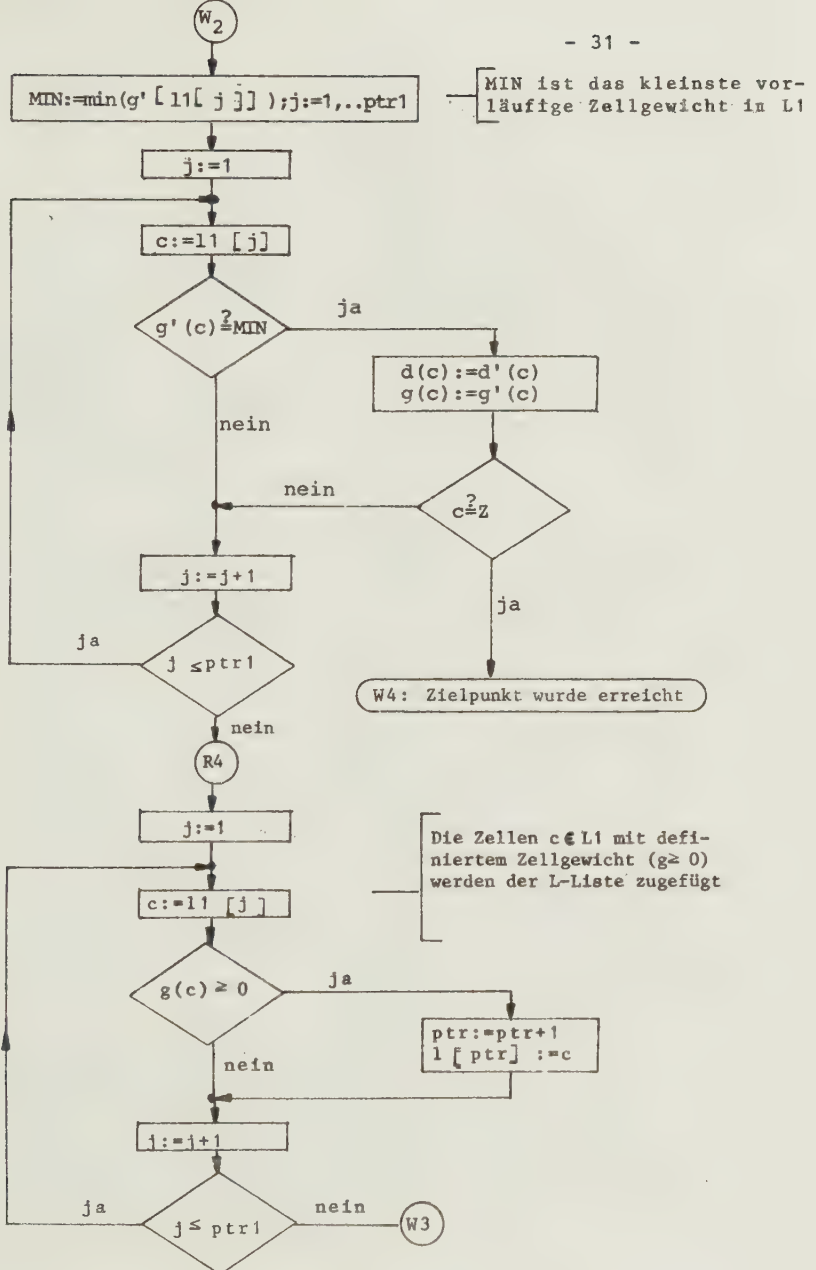


Bild 8c: Lee-Algorithmus

Zuordnung des endgültigen Zellgewichts $g(c)$ und des Vorwärtswertes $d(c)$ für alle $c \in L1$ mit minimalem $g'(c)$. Sprung nach W4 (Rückverfolgung des virtuellen Weges zum Startpunkt), falls der Zielpunkt erreicht wurde.

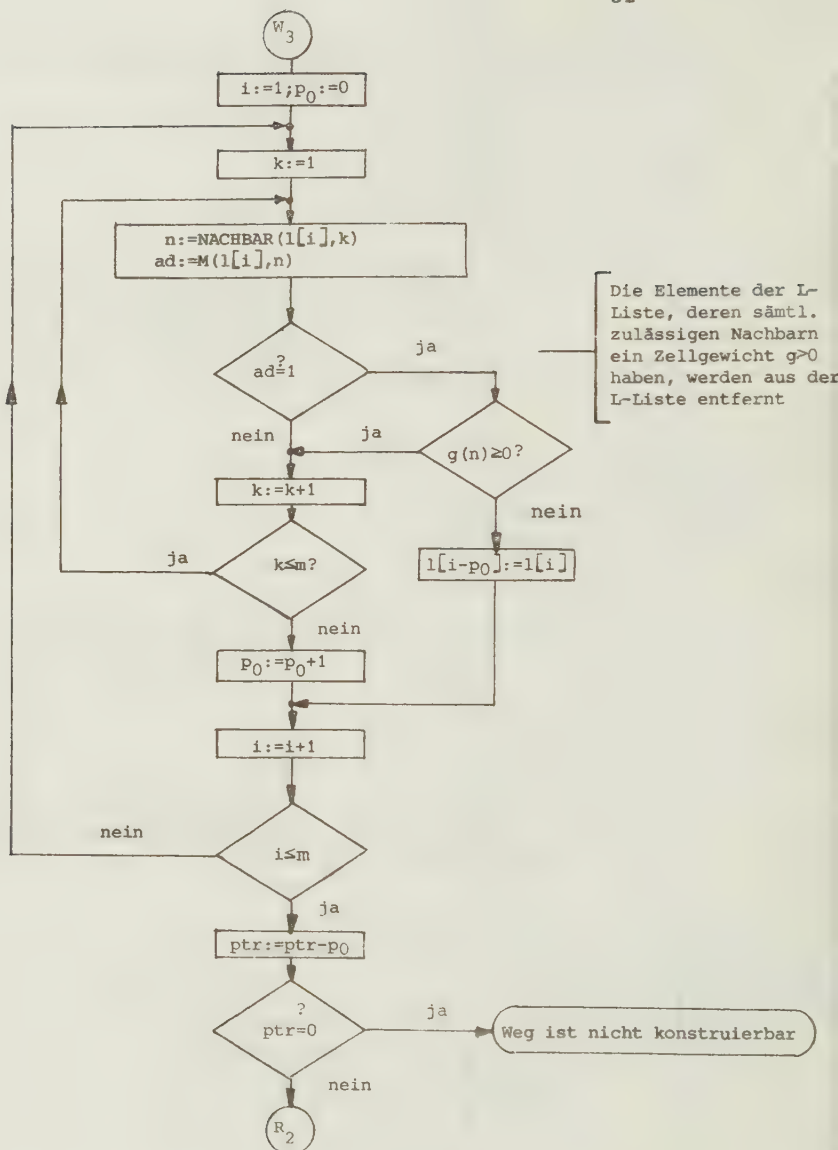


Bild 8d: Lee-Algorithmus

update der L-Liste. Falls die L-Liste nach dem update leer ist, kann die Verbindung nicht konstruiert werden.

3.1.4 Forderungen, die an einen Modellalgorithmus zu stellen sind

=====

- Zu A Die Nachbarn einer Zelle werden in Abhängigkeit vom Zelltyp $T = t(c)$ festgelegt. Die Nachfolger einer Zelle sind eine Untermenge dieser Nachbarn: Die Funktion NF_T bestimmt diese Nachfolger in Abhängigkeit von $D=d(c)$ und dem Zelltyp T . Die Anzahl der Nachfolger m ist ebenfalls eine Funktion von D und T . Damit wird a priori verhindert, daß Nachfolger generiert werden, die zu nicht sinnvollen Fortsetzungen von Wegen führen, also beispielsweise zu Schleifen.
- Zu B Die Konstruktionsstrategie besteht in der Auswahl eines Satzes von parametrisierten Regeln. Die Regeln sind Bestandteile eines Regelkatalogs und enthalten keinen direkten Bezug zu einer Rastergeometrie und damit keine Rasterbindung. Zur Bearbeitung einer bestimmten Entwurfsaufgabe wählt der Benutzer in Abhängigkeit vom Schwierigkeitsgrad eine Anzahl von Regeln aus. Der geometrische Bezug (Leiterbreiten, Mindestabstände) wird durch geeignete Besetzung der Regelparameter erzielt. Da die Rechenzeit mit der Anzahl der anzuwendenden Regeln und der zu untersuchenden Alternativen linear bis quadratisch ansteigt, wird die Abarbeitung der Verbindungsliste in mehreren Durchläufen versucht. Jede im vorangegangenen Durchlauf als nicht konstruierbar zurückgewiesene Leitung wird unter den aktuell geltenden, gelockerten Restriktionen einem neuen Konstruktionsversuch unterworfen.
- Zu C Die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Konstruktionsalgorithmus im Zellraum wird richtungsabhängig gemacht. Die relative Lage der zu verbindenden Punkte S und Z kann dazu benützt werden, bestimmte Fortsetzungsrichtungen völlig zu verbieten (vgl. B).

- Zu D Für die Wertung eines Übergangs $c_i \rightarrow c_{i+1}$ in einer virtuellen Leitung wird auch der Vorgänger von c_i herangezogen. (Das ist ein Kompromiß, um die Rechenzeit nicht stark ansteigen zu lassen).
- Zu E Nicht jedem Rasterlinienschnittpunkt im Leiterraster entspricht ein Punkt im Entwurfsraster (vgl. 2.3.1.1). Die Rasterlinien des Entwurfsrasters müssen bezüglich des Leiterrasters nicht äquidistant sein (vgl. 2.3.1.3). Wege werden in diesem fiktiven 'Entwurfsraster' konstruiert; nur der minimale Weg p^* wird in die physikalischen Raster abgebildet.
- Zu F Verbindungen können als Punkt-zu-Punkt Verbindung oder als Punkt-zu-Weg Verbindung konstruiert werden. Damit ist bei Potentialen, die an mehr als zwei Bausteinpins anliegen, die zweite Verbindung und sind alle weiteren Verbindungen als Anschlüsse an ein bereits konstruiertes Leiterelement konstruierbar, ohne daß der Anschlußpunkt zuvor berechnet werden müßte. Es sind mehrere Startpunkte zulässig: das ist wichtig bei logisch gleichartigen Anschlüssen oder der Konstruktion einer Verbindung von der Steckerleiste aus.

3.1.4.1 Wirkungsbereich von Leitungen und Durchkontaktierungen

Der Ausdehnung der Leitungen und Lötaugen muß an zwei Stellen des Konstruktionsalgorithmus Rechnung getragen werden:

1. Bei der Konstruktion der virtuellen Wege
 - Abfrage der Zulässigkeit eines Übergangs ohne Ebenenwechsel
 - Abfrage der Zulässigkeit eines Übergangs mit Ebenenwechsel
2. Bei der Abbildung der virtuellen Verbindung, die den minimalen Weg darstellt, in das Entwurfsraster.

Leiterelemente, Durchkontaktierungen, Baustein- und Steckeranschlüsse sind die Grundelemente, die einen Weg im Konstruktionsraster beschreiben. Durchkontaktierungen haben i.a. einen größeren Durchmesser als die Leiter. Ihre Wirkung auf die benachbarten Rasterpunkte wird durch den Lötangendurchmesser bestimmt, d.h. den metallisierten Bereich, der die betreffende Bohrung umgibt. Den Grundelementen einer Verbindung sind Wirkungsquerschnitte zugeordnet, deren Größen sich aus den jeweiligen Abmessungen ergeben. Es werden fünf Funktionen eingeführt, deren Anwendung auf c die Menge der Zellen in den jeweiligen Wirkungsquerschnitten liefert:

WL1= <c → C1> Zellen, die keine Durchkontaktierung aufnehmen dürfen, falls c ein Leiterelement enthält.

WL2= <c → C2> Zellen, die keine Leitung aufnehmen dürfen, falls c eine Durchkontaktierung enthält.

WL3= <c → C3> Zellen, die keine Durchkontaktierung aufnehmen dürfen, falls c eine Durchkontaktierung enthält.

WL4=<c → C4> Zellen, die keine Leitung aufnehmen dürfen, falls c einen Bausteinanschluß enthält.

WL5=<c → C5> Zellen, die keine Durchkontaktierung enthalten dürfen, falls c einen Steckeranschluß enthält.

3.1.4.2 Erweiterung des Zellalphabets S

Zu jeder Zelle c des Entwurfsrasters wird gespeichert:

- der Belegungsstatus $s = \lceil(c)$
 - der Signalstatus $Q_v = q_v(c)$ in Ebene v mit $v=1,2,3,\dots$
- $$Q_v = \begin{cases} 0 & \text{c ist in Ebene v kein Potential zugeordnet} \\ m & \text{c ist in Ebene v das Potential m zugeordnet} \end{cases}$$
- der Zelltyp T

Bei der Konstruktion einer Verbindung zu einem elektrischen Potential P gelten alle Zellen c mit $q_1(c)=P$ oder $q_2(c)=P$ als mögliche Zielpunkte, außerdem alle Zellen, denen Bau-steinanschlüsse entsprechen, die mit dem ursprünglichen Zielpunkt logisch gleichwertig sind und denen noch kein Signal eingeprägt wurde.

Beim Belegungsstatus s sind folgende Zustände zu unterscheiden, falls man annimmt, daß maximal zwei Leiterelemente in einer Ebene einem Zellpunkt zugeordnet werden können:

- s = r → in Ebene 1, Position '1' belegt -
- s = l → in Ebene 1, Position '2' belegt -
- s = rl → in Ebene 1, Position '1' und '2' belegt
- s = u → in Ebene 2, Position '1' belegt -
- s = o → in Ebene 2, Position '2' belegt -
- s = uo → in Ebene 2, Position '1' und '2' belegt -
- s = sd → Zelle mit Durchkontaktierung belegt -
- s = sb → Zelle mit Bauelementanschluß belegt -
- s = ss → Zelle mit Steckeranschluß belegt -
- s = sh → Zelle ist gesperrt für Durchkontaktierungen und Leitungen.

Die Zustände r,l,o,u sind beliebig miteinander kombinierbar. Bei Zellen, die nur ein Leiterelement in jeder Ebene aufnehmen dürfen, sind die Zustände, die Position '2' betreffen, nicht zulässig.

3.2 Skizzierung des Verfahrens =====

Das Verfahren arbeitet in zwei Phasen:

1. der Suchphase
2. der Rückverfolgungsphase

In 3.2.1 wird der Suchprozeß beschrieben, in dem die Verbindung im Entwurfsraster konstruiert wird. In 3.2.2 wird erläutert, wie durch Abbildung der Grundelemente des Weges in die entsprechenden Raster die Verbindung realisiert wird.

3.2.1 Konstruktion einer Verbindung im Entwurfsraster =====

Das verwendete Verfahren arbeitet punktorientiert. Ein Weg, d.h. eine Verbindung zwischen zwei Punkten bzw. zwischen einem Punkt und einem Teilbaum gleichen elektrischen Potentials wird als Verkettung von Punkten beschrieben.

Der Prozeß der Wegkonstruktion beginnt mit dem Startpunkt S, der Wurzel des virtuellen Leiterbaumes. Allen Knoten des Baumes entsprechen Zellpunkte im Entwurfsraster. In jedem Konstruktionsschritt werden ausgehend vom aktuellen Knotenbestand neue Knoten generiert, die im Leiterraster - sei es in der gleichen Ebene, sei es unter Ebenenwechsel über eine Durchkontaktierung - auch erreichbar sind. Für jeden Zellpunkt wird ein Verweis auf den Vorgänger gespeichert. So kann von jeder Zelle aus der Weg durch den Baum zum Startpunkt zurückverfolgt werden. Ein solcher Weg wird im folgenden 'virtueller Weg' genannt.

Der Abstand zwischen zwei aufeinanderfolgenden Zellen hat im Entwurfsraster den Wert dz_c , wobei c eine Aussage über die relative Lage von x und x' macht: $c=d(x')$. Aufeinanderfolgende Punkte eines Weges sind '1-Nachbarn' im Konstruktionsraster. Im Leiterraster sind sie je nach Richtung und Rastertyp 1-Nachbarn, 2-Nachbarn oder 3-Nachbarn.

Das physikalische Äquivalent des Knotenabstands dz ist raster-
typabhängig, und je nach Rastertyp auch noch von der relativen
Lage der Zellen zueinander abhängig.

In jedem Konstruktionsschritt ist das Gewicht aller bisher
konstruierten virtuellen Wege bekannt. Als zu realisierender Weg
wird bei Erreichen des Zielpunktes derjenige mit dem kleinsten
Gewicht gewählt. Das Gewicht eines Weges wird durch die Anzahl
seiner Zellen und die jeder Zelle zugeordnete Bewertung (Zuwachs
der Gewichtsfunktion) bestimmt.



Bild 9: Weg als Verkettung von Zellen

Wege werden in jeder der Leiterebenen mit einer Vorzugsrichtung
geführt, die nur lokal, für eine kurze Strecke, durchbrochen wer-
den darf. Die damit aufgezwungene Ordnung der Leiterbilder
schränkt zwar die Leiterführung im einzelnen ein, erlaubt aber das
parallele Führen von Leitungen über längere Strecken, das für
eine gute Ausnützung des Platzes wesentlich ist. Die Vorzugs-
richtung der Leiter wird in Ebene 1 senkrecht, in Ebene 2 waage-
recht gewählt. Bei vier Leiterebenen könnte die Vorzugsrichtung
in der Ebene 3 mit 45 Grad, in der Ebene 4 mit 135 Grad festge-
legt werden. Allerdings stören dann die achsparallelen Reihen
der Bausteinanschlüsse, so daß diese Möglichkeit nicht genutzt
wird und die Vorzugsrichtungen analog zu denen in Ebene 1 und
Ebene 2 gewählt werden.

Leiter werden nur in einer begrenzten Anzahl von Winkeln (8 bzw. 4) gegenüber den Koordinatenachsen geführt, um die Kontrolle auf Einhaltung der Mindestabstände zu erleichtern. Die Richtungsänderung eines Weges um 90 Grad hat wegen der einzuhaltenden Vorzugsrichtung in den Leiterebenen einen Ebenenwechsel zur Folge, d.h. eine Durchkontaktierung wird generiert. Richtungswechsel um weniger als 90 Grad werden zunächst ohne Ebenenwechsel durchgeführt und sind nur bis zur Erreichung des nächstgelegenen Rasterpunkts im Entwurfsraster erlaubt.

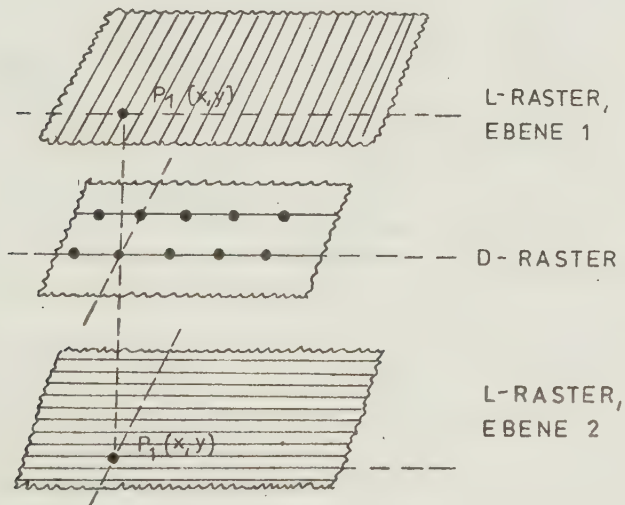


Bild 10: Rasterprojektionen

Daraus folgt: Richtungsänderungen im Leiterraster um 90 Grad können nur an Punkten vorgenommen werden, zu denen eine Abbildung im D-Raster existiert. Es genügt also, in einem bestimmten Leiterplattenbereich keine Elemente im D-Raster zu generieren, um einen geradlinigen Verlauf der Leiterbahnen in diesem Bereich zu erzwingen. Ein Richtungswechsel der Wege um 45 Grad sollte jedoch, falls es der Rastertyp zulässt, erlaubt sein, um das Umfahren von Hindernissen zu erleichtern.

3.2.2 Realisierung eines Weges =====

Erscheint in der Liste der Kandidaten für die Fortsetzung einer Verbindung einer der Zielpunkte oder wird ein schon konstruiertes Wegelement des gleichen Signals erreicht, wird die virtuelle Leitung vom Zielpunkt aus über die jeweiligen Verweise zurückverfolgt bis der Startpunkt der Verbindung erreicht wird. Dabei wird der Weg durch Ändern des Belegungsstatus und des Potentialstatus in das Entwurfsraster abgebildet. Die zur Realisierung der Ebenenwechsel benötigten Durchkontaktierungen werden in das D-Raster eingetragen. Entsprechend dem verwendeten Raster-typ hat eine Durchkontaktierung bei Zelle x einen durch Form und Größe definierten Wirkungsbereich, der es verhindert, daß später konstruierte Leitungen zu dicht an der Durchkontaktierung vorbeigeführt werden. Die betroffenen Zellen werden mit den Funktionen WL2 und WL3 ermittelt und ein entsprechender Vermerk gesetzt (vgl. 3.1.4.1).

3.2.3 Konstruktionstaktik =====

Alle virtuellen Wege beginnen beim Startpunkt bzw. bei den Startpunkten. Die Fortsetzung eines virtuellen Weges von Zelle x aus zur nächsten Zelle x' ist dann möglich, wenn der Belegungsstatus in x und x' dies zuläßt und die Richtung dabei um nicht mehr als 45 Grad geändert wird. Bei Richtungsänderungen um 90 Grad muß außerdem zu x ein Verweis auf ein koordina-tengleiches Element im D-Raster existieren.

Im allgemeinen gibt es mehrere Fortsetzungsmöglichkeiten von x aus: um die (lokal) optimale Fortsetzung zu finden, werden die Übergänge $x \rightarrow x'$ mit einer Funktion g bewertet.

Diese Funktion berücksichtigt einerseits die Vorgeschichte, d.h. den Verlauf der virtuellen Leitung bis zum Punkt x , andererseits den Status von x und x' . Der Zuwachs $G = g(x') - g(x)$ steuert die Fortsetzung der virtuellen Leitung von Punkt x' : Bei $G=1$ darf x' schon im nächsten Konstruktionsschritt Nachfolgeknoten generieren, bei $G > 1$ wird x' in einer Warteschleife gehalten, deren Dauer durch den Betrag von G bestimmt ist. Wird in einem Konstruktionsschritt ein Zielpunkt erreicht, bricht der Konstruktionsalgorithmus ab. Werden mehrere Zielpunkte erreicht - jeder Punkt im Entwurfsraster, dem ein Potential zugeordnet ist, das mit dem des zu konstruierenden Weges übereinstimmt, zählt als Zielpunkt - wird derjenige mit dem kleinsten G -Wert ausgewählt.

Die virtuelle Leitung wird durch Folgen der Verweispfeile zum Startpunkt zurückverfolgt und in das Entwurfsraster, das D-Raster und das L-Raster abgebildet. Nicht benötigte Startpunkte werden freigegeben. Der Algorithmus bricht auch ab, wenn am Ende eines Konstruktionsschrittes (vgl. Bild 11b) keine Fortsetzung der virtuellen Leitungen mehr konstruiert werden kann, d.h. alle Listen $L^{(1)} \dots L^{(r)}$ leer sind. Die Verbindung gilt dann unter den aktuell geltenden Konstruktionsregeln als nicht konstruierbar. Um die Verbindung doch noch zu entwerfen, gibt es zwei Möglichkeiten:

1. der aktuelle Regelkatalog wird modifiziert -
2. es wird ein weiteres Leiterebenenpaar zugelassen -
3. es wird ein feineres Konstruktionsraster gewählt.

3.2.4 Vergleich des Modellalgorithmus mit dem Lee-Algorithmus =====

Die Algorithmen unterscheiden sich in der 'Such-Phase', d.h. der Konstruktion der virtuellen Wege bis der Zielpunkt (bzw. einer der Zielpunkte beim Modellalgorithmus) gefunden wird, oder der Weg als unter den aktuell geltenden Restriktionen nicht konstruierbar zurückgewiesen wird (vgl. Bilder 8a - 8c und Bild 11). Der Vorteil der Vorgehensweise des Modellalgorithmus wird in Form von Zustandsgraphen in den Bildern 12 und 13 verdeutlicht, wo die Zustände Z dargestellt sind, die eine Zelle durchlaufen muß, um vom Ausgangszustand 'unbearbeitet' zum Endzustand 'abgearbeitet' zu gelangen. Der Modellalgorithmus vermeidet Schleifen (vgl. dagegen $Z3 \rightarrow Z3$, und $Z1 \rightarrow Z2 \rightarrow Z1$ bei Lee) und ist wegen des einfachen Kriteriums für den Übergang zum Nachfolgezustand (Wert der g -Funktion) wenig rechenintensiv.

Benützte Funktionen, soweit sie noch nicht definiert wurden:

Funktionsname	Argumente	Wirkung
NF_T	i, k	Anzahl der Nachfolger m zu einer Zelle c mit $d(c)=i$ für $k=0$ Nachbarindex des k -ten Nachfolgers einer Zelle c mit $d(c)=i$ für $k=1,2,\dots,m$
g	i, k	Gewichtszuwachs beim Übergang von einer Zelle x mit $d(c)=i$ auf eine Zelle x' mit $d(x')=k$
dz	i	Zellabstand zwischen einem Nachfolger mit Index i zu seinem Vorgänger
Ebene	i	Ebene des Übergangs zum i -ten Nachbarn
f	s_1, s_2, E	Zulässigkeit des Übergangs von einer Zelle x mit $s_1=f(x)$ nach einer Zelle x' mit $s_2=f(x')$ in Ebene E .

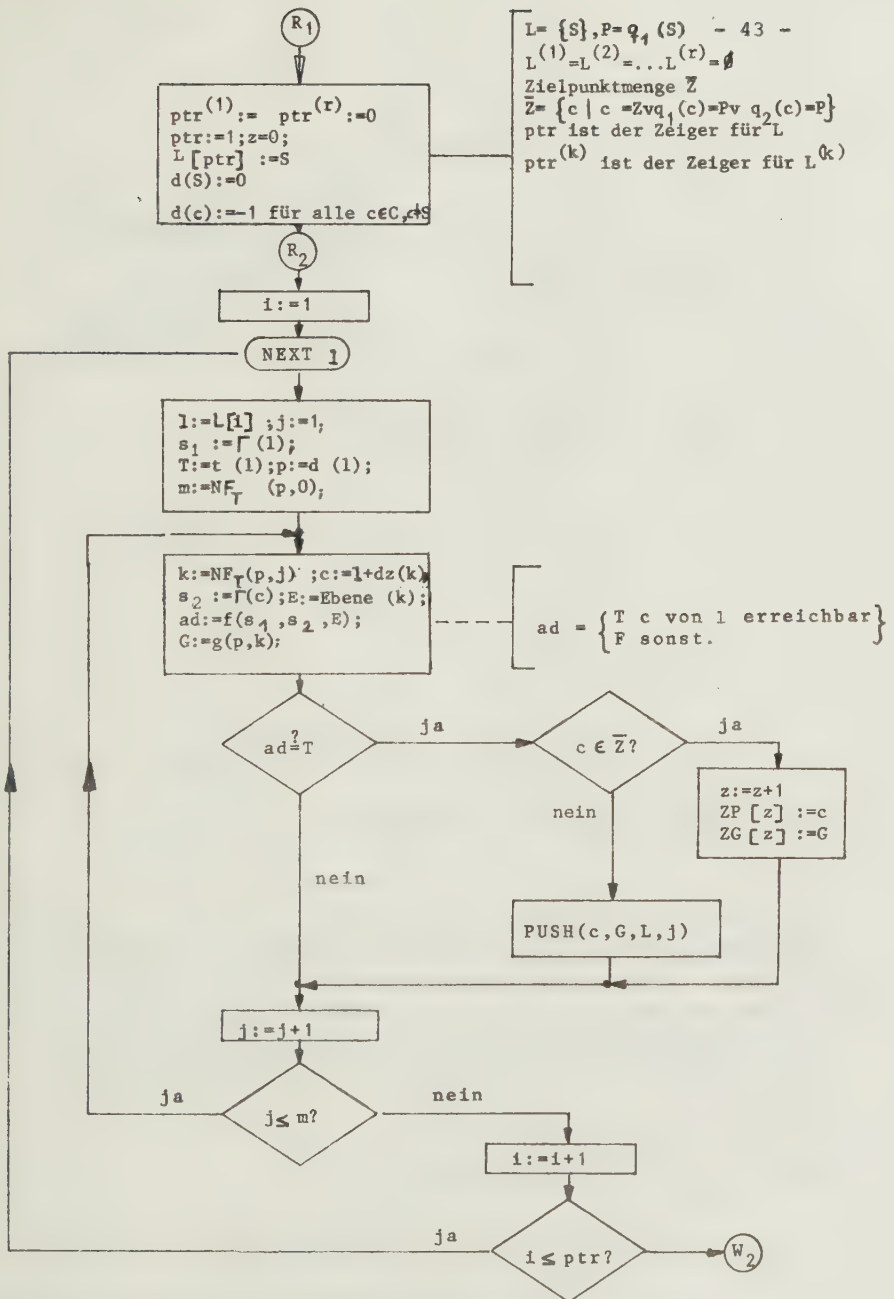
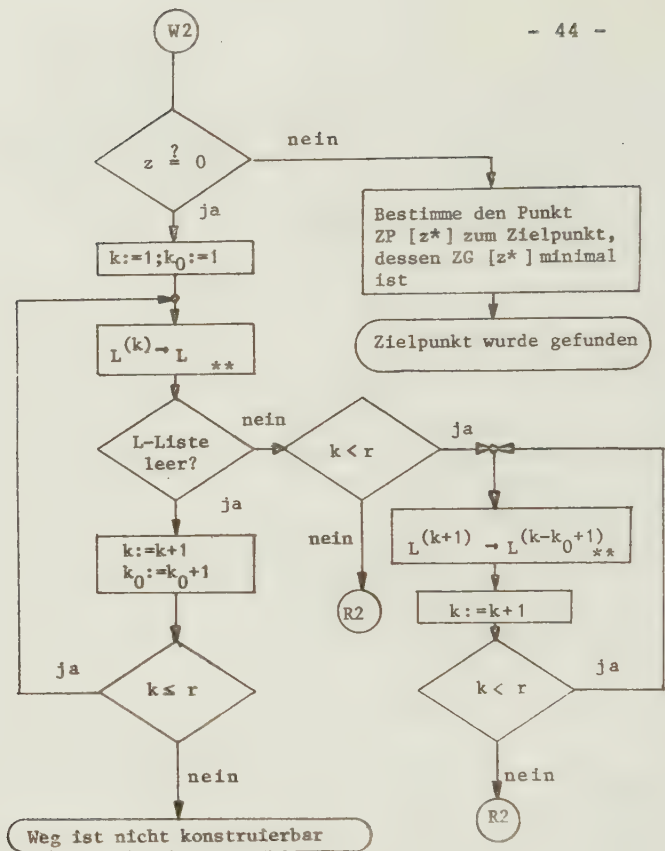


Bild 11a: Modellalgorithmus:
Initialisierung und Füllen der Listen $L^{(1)} \dots L^{(r)}$



Leistung des Unterprogramms PUSH(c,G,L,j)

Anfügen des Elements c der Liste $L^{(G)}$. Erhöhen des Zeigers $\text{ptr}^{(G)}$ um 1. Bei $G = 1$ wird das Element c der $L^{(1)}$ -Liste nur dann angefügt, wenn es noch nicht in $L^{(1)}$ enthalten ist. Falls es angefügt wird, wird der Verweis auf den Vorgänger gesetzt: $d(c)=j$. Informationselement in $L^{(G)}$ für $G > 1$: $\begin{bmatrix} c & j \end{bmatrix}$, wobei j der 'vorläufige' Verweis der Zelle l ist.

Bild 11b: Modellalgorithmus: update der Listen

- * falls $k > 1$ ist, wird beim Eintragen im L geprüft, ob das Element schon vorhanden ist.
- ** beim Anfügen eines Elements c in die $L^{(1)}$ -Liste oder L-Liste wird dessen vorläufiger Verweis als endgültiger Verweis eingetragen.

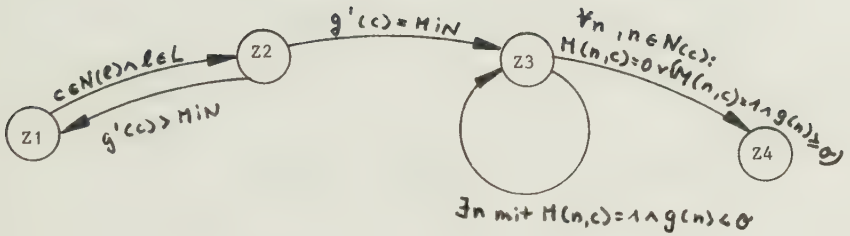


Bild 12: Zustandsgraph für Zellen im Lee-Algorithmus

- Z1 Zelle c ist unbearbeitet: $g'(c) = \text{undefiniert}$, $g(c) = -1, c \notin L$
- Z2 Zelle c wird bearbeitet: $g'(c)$ ist definiert, $g(c) = -1, c \notin L$
- Z3 Zelle c ist in L-Liste: $c \in L$, $g(c) \geq 0$
- Z4 Zelle ist abgearbeitet: $g(c) \geq 0, c \notin L$, $d(c)$ definiert, alle zulässigen Nachbarn von c haben ein definiertes Zellgewicht.

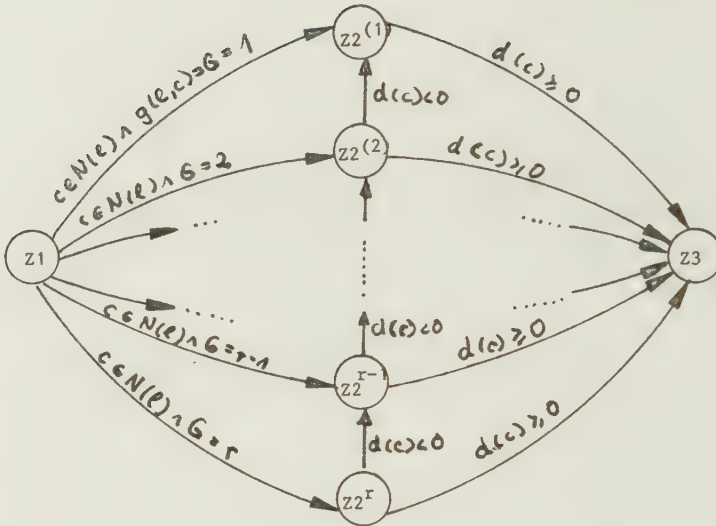


Bild 13: Zustandsgraph für Zellen beim Modellalgorithmus

- z1 Zelle c ist unbearbeitet; $d(c) = -1$, d.h. es existiert kein Verweis auf einen Vorgänger
- z2^(G) Der Zelle c wird entsprechend der Bewertung des Übergangs $l \rightarrow c$ ein Zellgewicht zugewiesen: $l \in L, c \in N(l), c \rightarrow L^G$
Bei $G=1$ wird c der Liste $L^{(1)}$ angefügt und als Verweis $d(c)$ der Index k eingetragen, d.h. c ist der k -te Nachbar seines Vorgängers l .
Bei $G \geq 2$ wird c in die entsprechenden Listen L^G eingetragen und k als vorläufiger Verweis für c .
- z3 Die Zelle c ist abgearbeitet; $d(c) \geq 0$

3.3 Auswahl des Konstruktionsrasters

=====

Die Einbettung einer virtuellen Verbindung in das Leiterraster und das D-Raster setzt voraus, daß jedem Punkt im Entwurfsmaster ein Koordinatenpaar im L- und D-Raster entspricht und jedem Verweispfeil eine Strecke im L-Raster, die noch frei von Leitungen ist und nicht von einem Leiterzug eines anderen Signals in der betrachteten Ebene gekreuzt wird.

Die Abbildungsfunktionen zwischen Leiterraster und Entwurfsmaster sind rastertypabhängig. Um bei der Abbildung keine Konflikte mit schon vorhandenen Leitern zu erhalten, wird bei der Konstruktion der Leitung mit Hilfe der ebenfalls rasterabhängigen Funktion f die Zulässigkeit der Übergänge im Nahbereich einer Zelle geprüft. Das setzt voraus, daß die Nachfolger $N(x)$ einer Zelle x so definiert werden, daß die Zulässigkeit des Übergangs entscheidbar ist und nur von dem jeweiligen Zellstatus von x bzw. $x' \in N(c)$ abhängt.

Das Raster kann während des Entwurfs nicht geändert werden. Zur Wahl des Rastertyps wird die zu erwartende Gesamtleitungslänge bei der Aufstellung der Verbindungsliste geschätzt und mit der für Leitereinbettung zur Verfügung stehenden Rasterliniengesamtlänge verglichen. Man kann davon ausgehen, daß eine Nutzung von mehr als 80% der Rasterlinien im Leiterraster von einem Programm auf keinen Fall erreicht werden kann. Bei etwa 80% liegt die Grenze für einen Konstrukteur, der, wie in 2.2 erläutert, gegenüber einem nach starren Regeln arbeitenden Programm im Vorteil ist.

Für eine Grobübersicht über die zu erwartende Leitungslänge wird vor Beginn der Wegekonstruktion beim Aufstellen der Verbindungsliste zu jedem Satz zu verbindender Anschlußpunkte ein Baum (Signalbaum) generiert, dessen Knoten die Baustein- bzw. Stecker-Anschlußpunkte sind und dessen Kanten die zu konstruierenden Wege darstellen. Wegen der späteren Realisierung wird als Baumstruktur der Steinerbaum [5] gewählt. Die Kanten des Baumes werden achsparallel entsprechend den Vorzugsrichtungen auf den beiden

Leiterebenen angenommen. Die Aufsummierung der Länge aller Zweige aller Bäume liefert eine untere Schranke für die Gesamtleitungslänge.

Die Generierung der Signalbäume erlaubt außerdem eine Abschätzung für die Leiterdichtevertelung in den Leiterebenen. In jeder der Leiterebenen werden Schnitte senkrecht zur Vorzugsrichtung in dieser Ebene gelegt und gezählt, wieviele Signalzweige (Wege) diese Schnittlinie kreuzen. Der Vergleich mit der Kapazität dieser Schnittlinie (durch den Rastertyp und die Abmessungen der Leiterplatte gegeben) erlaubt eine Abschätzung über den zu erwartenden Vollständigkeitsgrad der Leiterführung.

Eine Analyse des mit dem Modellalgorithmus tatsächlich erzielten Nutzungsgrades von Rasterlinien ergibt Werte bis zu 90% für die Leiterebene mit horizontaler Vorzugsrichtung. Für die Leiterebene mit vertikaler Vorzugsrichtung werden - bedingt durch die horizontal verlaufenden Bausteinanschlußreihen - nur Werte um 50 % erreicht.

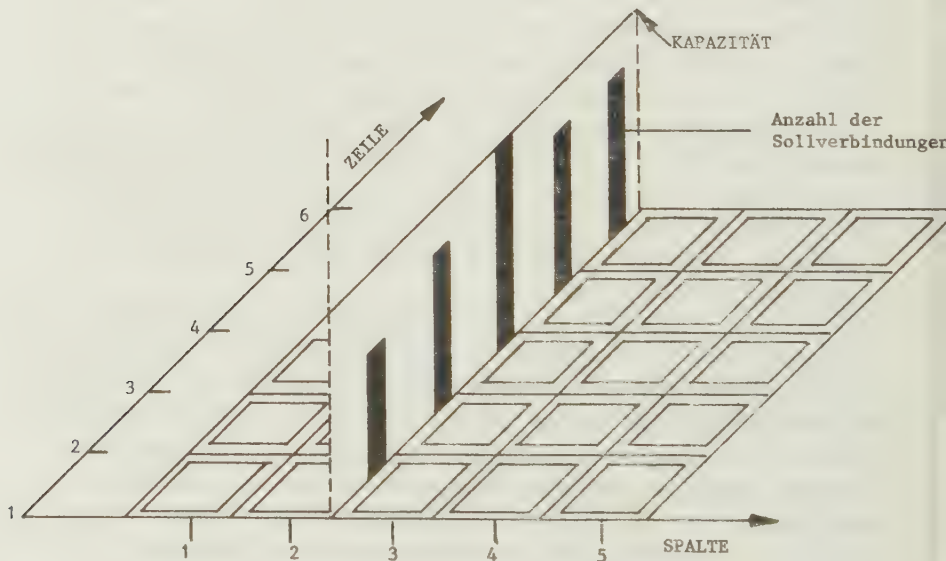


Bild 14: Kapazität und Belastung einer Schnittlinie LP mit 5*6 Standardeinbauplätzen

In Bereichen, in denen mehr als 80 % bzw. 50% der Kapazität benötigt wird, ist damit zu rechnen, daß das Leiterfindungsprogramm nicht alle geforderten Verbindungen konstruieren kann. Man wird dann versuchen, durch Ändern der Plazierung einzelner Bausteine, die Dichteverteilung gleichmäßiger zu machen und damit Belastungsspitzen abzubauen. Das kann beispielsweise durch Plazierung anschlußreicher Bausteine an den Rändern der Leiterplatte erreicht werden, wenngleich sich dadurch die zu erwartende Gesamtleitungslänge erhöht.

3.4 Konstruktionsregeln im Nahbereich =====

Unter Nahbereich einer Zelle werden die 1-Nachbarn (nächster Zellpunkt) und 2-Nachbarn (übernächster Zellpunkt) verstanden. Der Modellalgorithmus benutzt die im Nahbereich von Zellen geltenden Konstruktionsregeln zum regelrechten Entwurf der Verbindungen.

3.4.1 Nachfolgerfunktion =====

Mit der Nachfolgerfunktion wird festgelegt, welche Punkte x' von einem von Punkt x aus erreichbar sind. Für die Nachfolger x' einer Zelle x muß folgendes gelten:

- die Punkte x' und x müssen Elemente des Entwurfsrasters sein -
- die Punkte x' müssen so ausgewählt werden, daß die aus dem Übergang $x \leadsto x'$ resultierende Richtungsänderung bei x nicht mehr als 90 Grad beträgt -
- die Zulässigkeit des Übergangs $x \leadsto x'$ muß allein (bei Kenntnis der Ebene E des Übergangs) aus dem Belegungsstatus $\Gamma(x)$ bzw. $\Gamma(x')$ entscheidbar sein.

Die Anzahl der Nachfolgerpunkte x' zu einem Punkt x kann durch die zusätzliche Forderung reduziert werden, daß der Übergang $x \rightarrow x'$ eine Annäherung an den Zielpunkt erbringen muß (vgl. 4.1.3.2).

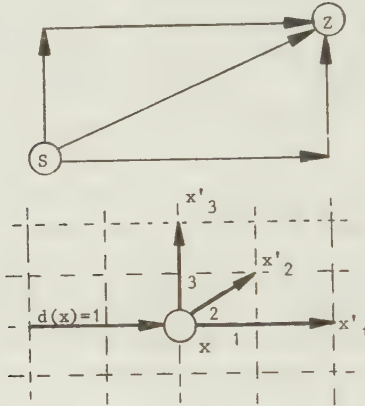


Bild 15: Beschränkung der möglichen Nachfolger durch die relative Lage von Startpunkt S und Zielpunkt Z .

3.4.2 Gewichtungsfunktion g =====

Die Gewichtungsfunktion legt fest, wie die Fortsetzung einer virtuellen Leitung, also der Übergang von einem Punkt x nach dem Punkt x' bewertet wird. Diese Bewertung kann vom Benutzer beeinflusst werden. Der geradlinigen Fortsetzung eines Weges sollte immer die beste Bewertung, d.h. $G=1$ gegeben werden.

3.4.3 Zulässigkeitsfunktion f =====

Die Funktion f legt fest, ob der Übergang $x \rightarrow x'$ zum aktuellen Zeitpunkt, d.h. unter Berücksichtigung schon vorhandener Leitungen, noch möglich ist. Die Funktion f ist abhängig vom Belegungsstatus $\Gamma(x)$ bzw. $\Gamma(x')$ und E. In jedem Rastertyp existieren n verschiedene Belegungszustände ($n \geq 2$) von Zellen.

Die Funktion f entspricht der in 3.1.1 definierten M-Funktion.

Bei Entwurfsrastern mit Zellen, die mehrere Leiterelemente in einer Ebene aufnehmen können (vgl. 5.2.2), muß bei der Berechnung von f die Position in x bzw. x' bekannt sein.

Beim D127-Raster (2.3.1.1) beispielsweise gibt es sieben Zustände:

- s = 0 unbelegt in beiden Ebenen
- s = 1 belegt in Ebene 1
- s = 2 belegt in Ebene 2
- s = 3 belegt in Ebene 1 und 2, aber keine Durchkontaktierung
- s = 4 belegt mit einer Durchkontaktierung
- s = 5 belegt mit Steckerkontaktpunkt
- s = 7 gesperrt für Leitungen und Durchkontaktierungen

Die Funktion f kann nur die Werte 't' (ja) oder 'f' (nein) annehmen.

$$f(\Gamma(x), \Gamma(x'), E) \begin{cases} 't' \rightarrow x' \text{ ist von } x \text{ in Ebene } E \text{ erreichbar} \\ 'f' \rightarrow \text{sonst.} \end{cases}$$

Beim Raster D127 sieht das folgendermaßen aus:

		$\lceil(x')$	0	1	2	3	4	5	6	7
E	$\lceil(x)$									
u	0	T	T	T	F	F	F	F	F	F
	1	T	F	T						
	2	T	T	F						
1	0	T	T	F						
	1	F	F	F						
	2	T	T	F						
2	0	T	F	T						
	1	T	F	T						
	2	F	F	F	↓	↓	↓	↓	↓	↓

Bild 16: Zulässigkeit des Übergangs $x \rightarrow x'$ als Funktion von $\lceil(x)$ und $\lceil(x')$ und der Ebene E des Übergangs $x \rightarrow x'$
E=u: Ebene ist nicht festgelegt (z.B. bei Übergängen in Richtung der Rasterdiagonalen).

Matrixelemente mit $\lceil(x) > 2$ sind nicht aufgeführt, da sie immer den Wert 'F' haben. Eine Ausnahme muß für den Start- und Zielpunkt einer Verbindung gelten. Diesen Punkten wird bei Beginn der Wegkonstruktion temporär der Belegungsstatus '0' zugewiesen, damit sie als Vorgänger bzw. Nachfolger zulässig sind.

3.4.4 Durchkontaktierungen zur Realisierung von Ebenenwechseln

Die Wirkung eines Ebenenwechsels mit Durchkontaktierung hängt vom verwendeten Entwurfsraster ab. Im D127-Raster hat eine Durchkontaktierung bei Punkt P(X,Y) nur eine Wirkung auf die Repräsentation des Punktes im Entwurfsraster. Bei feineren Rastern bewirkt eine Durchkontaktierung eine Blockierung der angrenzenden Rasterpunkte. Der 'Wirkungsquerschnitt' der Durchkontaktierung ist formelmäßig aus den geometrischen Relationen angebbar (vgl. 3.1.4.1).

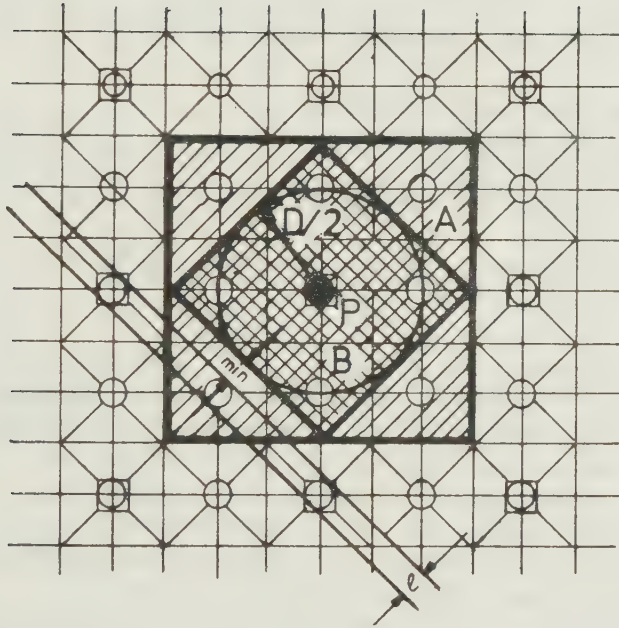


Bild 17: Wirkungsbereich einer DK bei Punkt P:

keine Durchkontaktierungen im Abstand

$dd < D + \min \rightarrow$ Bereich A ;

keine Leitungen im Abstand

$dl < \min + D/2 + l/2 \rightarrow$ Bereich B .

Mit D Durchmesser der DK

l Leiterbreite

und den Funktionen

$$WL3(P) = \{c'' | c'' \in A \cup B\};$$

$$WL2(P) = \{c' | c' \in B\} \text{ mit } P \in C, A \subset C, B \subset C.$$

4. AUFBAU DES LEITERFINDUNGSLGORITHMUS

4.1 Struktur, Datenfluß und Informationsdarstellung =====

Das Leiterfindungsprogramm versucht mit Hilfe

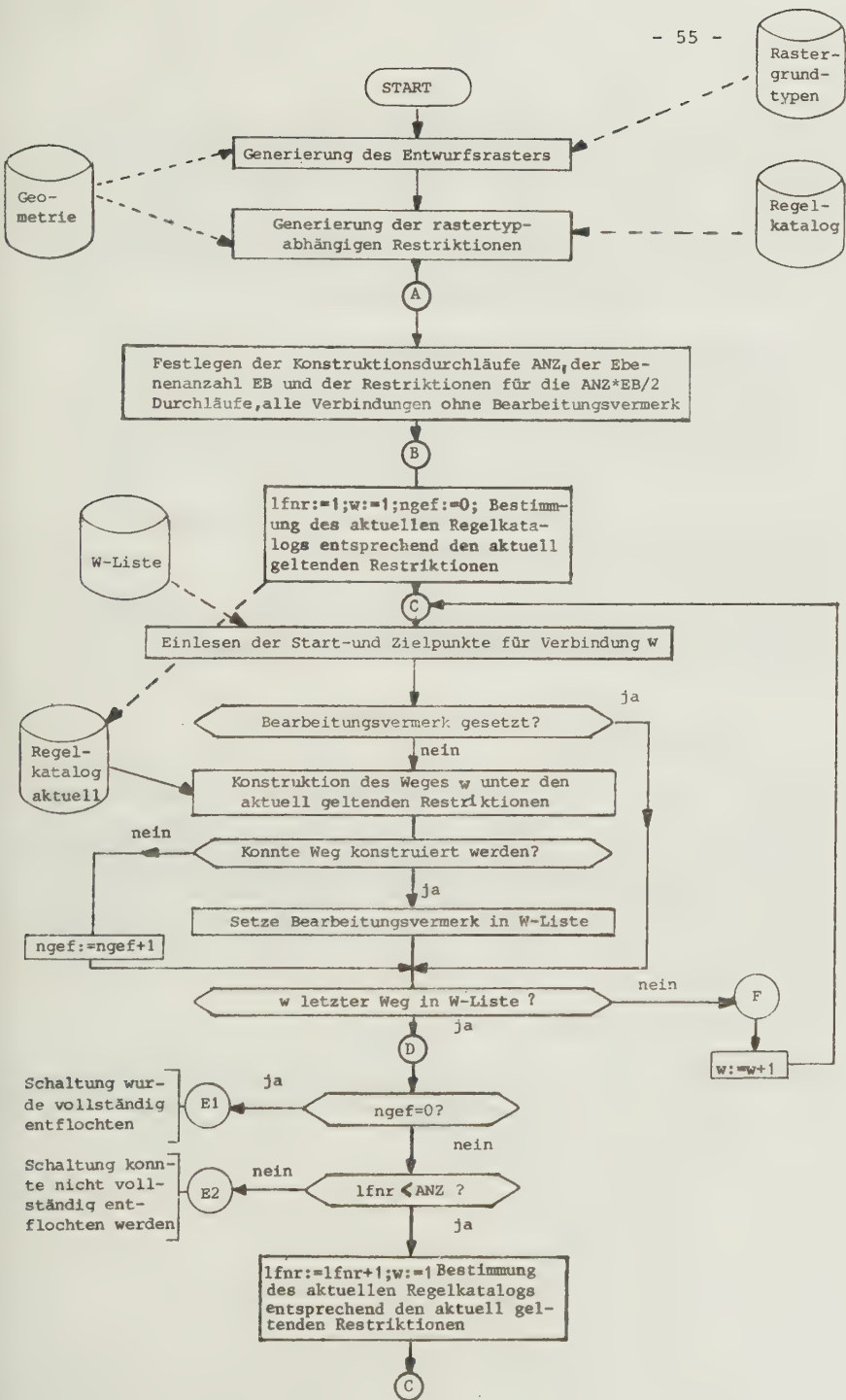
- . eines Konstruktionsalgorithmus
- . eines Regelkatalogs
- . einer Geometriedatei
- . verschiedener Abbildungsfunktionen

die Verbindungsliste in einem oder mehreren Durchläufen vollständig abzuarbeiten.

Die Verbindungsliste ist so sortiert, daß strukturmäßig einfache und kurze Verbindungen zuerst bearbeitet werden. Es werden also nicht alle zu einem Potential gehörenden Verbindungen hintereinander konstruiert. Daraus folgt, daß zu jedem Punkt im Entwurfsraster neben dem Belegungsstatus s auch die Signalbelegung Q_v gespeichert werden muß, wenn Verbindungen nicht nur als Punkt-Punktverbindungen sondern auch als Punkt-zu-Teilbaum Verbindungen realisiert werden sollen.

Der Informationsvektor $\text{Inf}(x)$ zu einer Zelle x hat bei zwei Leiterebenen vier Elemente (Belegungsstatus s , Signalbelegung Ebene 1 Q_1 , Signalbelegung Ebene 2 Q_2 , Zelltyp T).

Neben dieser langfristig zu speichernden Information ist während der Konstruktion einer Verbindung zu jedem Punkt jedes virtuellen Weges der Verweis auf den Vorgänger zu speichern, der die Rückverfolgung des minimalen Weges vom Zielpunkt zum Startpunkt erlaubt.



Die Konstruktion der Verbindungen wird entsprechend den Angaben des Benutzers in einem oder mehreren Durchläufen versucht, wobei bei jedem weiteren Durchlauf die Restriktionen, die bei der Konstruktion gelten sollen, gelockert werden. Art und Wirkung der Beschränkungen sind Bestandteil des Regelkatalogs. Typische Beschränkungen sind:

- . Konstruktion nur in einem dem Start- und Zielpunkt unbeschriebenen Rechteck -
- . Beschränkung der Anzahl der Richtungswechsel innerhalb einer Verbindung -
- . Beschränkung der erlaubten Richtungen für die Fortsetzung eines virtuellen Weges -
- . Definition von Mustern, die Zellpunkte enthalten, an denen keine Ebenenwechsel möglich sind.

4.1.1 Geometriedatei =====

Die Geometriedatei enthält die Abmessungen für die Leiterbreiten l , die Lötaugen d für Durchkontaktierungen, Bausteinanschlüsse und Steckeranschlüsse und den einzuhaltenden Mindestabständen zwischen diesen Grundelementen, aus denen Wege zusammengesetzt werden. Sie enthält weiter die Konstruktionsregeln im Nahbereich einer Zelle in Tabellenform (vgl. 7.4).

4.1.2 Rastergenerierung =====

Die kleinste Leiterbreite und der Mindestabstand legen die Gitterweite g des Leiterrasters fest.

$$g = l + \min$$

Bausteinanschlüsse, Steckeranschlüsse und Durchkontaktierungen müssen in dieses Raster projiziert werden. Die Gitterweite g ist also so zu modifizieren, daß

$$i * g' \Rightarrow \text{Gitterweite des D-Rasters} = g_d,$$

$$j * g' \Rightarrow \text{Gitterweite des BA-Rasters} = g_b,$$

$$k * g' \Rightarrow \text{Gitterweite des SA-Rasters} = g_s; i, j, k \in \mathbb{N}$$

Die Aufgabe wird dadurch erleichtert, daß bei handelsüblichen Bauteilen und Steckerleisten der Kontaktabstand genormt ist und i.a. ein ganzzahliges Vielfaches von 2.54 mm beträgt. Es ergeben sich zwei Bedingungen für g' :

$$g' \geq 1 + \min;$$

$$k_1 * g' = g_b; k_2 * g' = g_s; \text{ mit } k_1, k_2 = 1, 2, 3, \dots$$

Üblicherweise wird mit Leiterbreiten von 0.3 mm, einem Mindestabstand von 0.3 mm und $g_b = g_s = 2.54$ mm gearbeitet. Damit ergibt sich:

$$k \leq 2.54 \text{ mm} / (1 + \min)$$

$$k \leq 4 \rightarrow g' = 0.635 \text{ mm}$$

Die Durchkontaktierungen müssen ebenfalls im L-Raster liegen. Bestimmungsgleichungen für die Rastergitterweite g_d sind:

$$g_d \geq DD + \min \text{ und mit } DD = 1.1$$

$$g_d \geq 1.4$$

Durchkontaktierungen sollten aber auch im BA-Raster liegen:

$$k * g_d = g_b; \text{ mit } g_d \geq 1.4 \text{ folgt:}$$

$$k \leq 2.54 / 1.4 \rightarrow k=1 \rightarrow g_d = 2.54 \text{ mm}$$

Das ergibt eine schlechte Ausnutzung des Platzes, da der minimale Abstand zwischen Durchkontaktierungen unnötigerweise auf 1.14 mm erhöht wird. Eine bessere Nutzung ergibt sich, wenn man für die Durchkontaktierungen zwei gegeneinander verschobene Raster mit der Gitterweite 2.54 mm annimmt.

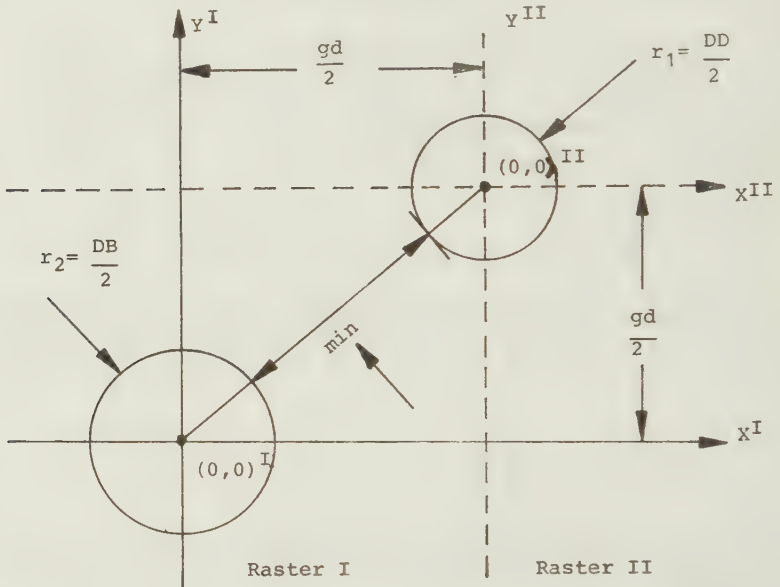
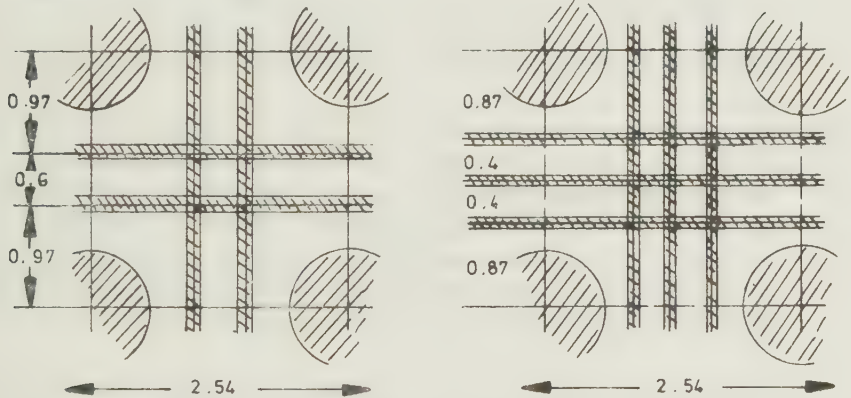


Bild 19: Mindestabstand $\min$ bei zwei gegeneinander verschobenen Rastern (I und II) mit Gitterweiten $gd=2.54$ mm

Neben diesen Überlegungen, die zu Rastern mit äquidistanten Abständen führen, könnte man auch Raster mit variabler Gitterweite definieren, die den unterschiedlichen Abmessungen der Leiter und Lötungen a priori Rechnung tragen. Ein solches Raster wurde in 2.3.1.3 bereits vorgestellt (DU-Raster).

Dieses Raster hat den Vorteil, daß wie beim D127-Raster nur die jeweils betroffenen Rasterpunkte und nicht Bereiche bei der Konstruktion der virtuellen Leitungen abgefragt werden müssen und trotzdem eine höhere Leiterdichte als beim D127-Raster erreicht wird (Bild 20a). Die Abbildung Entwurfsmuster → Leitermuster ist allerdings nicht mehr eindeutig: einer Zelle im Entwurfsmuster entsprechen bis zu 4 Rasterlinienschnittpunkte im L-Raster.



a) DU-Raster

b) modifiziertes D635-Raster

Bild 20: Raster mit variabler Gitterweite

Die Bedingungen für Leiterbreiten, Mindestabstand und Lötangendurchmesser sind:

$$DD + 3 \cdot \min + 2 \cdot 1 \leq 2.54$$

Mit $\min = 1$ folgt:

$$DD + 5 \cdot 1 \leq 2.54$$

Es gibt mehrere Lösungen, z.B. $l = 0.25$, $DD = 1.29$ oder $l = 0,3$, $DD = 0.97$. Auch aus dem D635-Raster läßt sich ein Raster mit variabler Rasterweite ableiten (Bild 20b).

4.1.2.1 Zell-, Raster-, Koordinatendarstellung

Der Konstruktionsalgorithmus soll unabhängig vom Rastertyp arbeiten. Wie in dem vorangegangenen Abschnitt gezeigt wurde, ist der Abstand zwischen Rasterpunkten im L-Raster rastertyp-abhängig. Das L-Raster ist also als Entwurfsraster nicht geeignet.

Für das Entwurfsraster werden die Begriffe Zelle und Zellabstand eingeführt, die den Begriffen Rasterpunkt und Gitterweite in den anderen Rastern entsprechen. Ein Weg besteht im Entwurfsraster aus einer Verkettung von benachbarten Zellen. Jedem Punkt im D-Raster und jedem Rasterlinienabschnitt im L-Raster ist eine Zelle zugeordnet. Jeder Zelle ist ein Bereich (im Spezialfall ein Punkt) im D-Raster und L-Raster zugeordnet.

R-Typ	Richtung	Abstand $x \rightarrow x' [RE]$	D-Raster [mm] *	L-Raster [mm] *
D127	vert/hor	$ry/rx=2$	2.54	1.27
	diagonal	$rx=ry=1$	1.79	1.79
D635	vert/hor	$ry=rx=2$	1.27	0.635
	diagonal	$rx=ry=1(2)$	0.90	
DU	vert/hor	$ry/ry=3$	2.54	1.02/0.5 oder 0.97/0.6
	diagonal	$rx=1, ry=1$ $rx=1, ry=2$ $rx=2, ry=1$ $ry=2, ry=2$	1.79	

4.1.2.2 Abbildungsvorschriften

Für jeden Rastertyp werden zwei Transformationsprozeduren und die inversen Prozeduren benötigt:

1. z, r_x, r_y für die Umwandlung der Rasterdarstellung in die Zelldarstellung und umgekehrt
2. k, k^{-1} für die Umwandlung der Rasterdarstellung in die Koordinatendarstellung und umgekehrt

Die Beschreibung einer Verbindung ist je nach Aufgabenstellung unterschiedlich:

Aufgabe	Beschreibungsform
Wegkonstruktion	Zelldarstellung
Abbildung in Leiterebene	Rasterdarstellung
Druck-, Klebevorlage	Koordinatendarstellung

Weiter muß die Abbildung eines Weges in das L-Raster und das D-Raster rastertypabhängig definiert werden. Durchkontaktierungen und Leitungen mit einer Breite von $i \cdot l$, $i \geq 1$ (l ist dabei die kleinste Leiterbreite, auf die die Rasterweite des L-Rasters abgestimmt ist), können neben ihrer lokalen, auf einen Punkt beschränkten Wirkung in den betreffenden Rastern eine Wirkung auf die benachbarten Rasterpunkte bzw. Rasterlinien haben.

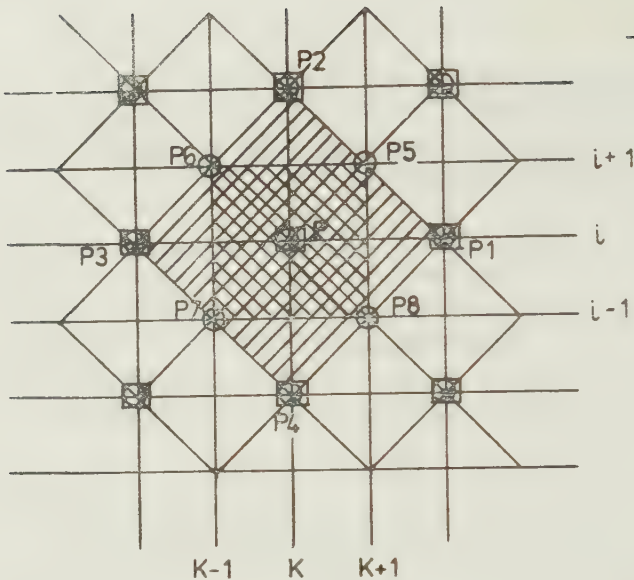


Bild 21: Wirkungsbereich einer DK bei Punkt P mit den Koordinaten $x=k$, $y=i$ im D635-Raster

Ein Beispiel dafür ist das D635-Raster: eine Durchkontaktierung bei P sperrt die Punkte P5, P6, P7, P8 für Leitungen in beiden Richtungen, die Punkte P1 bis P8 für Durchkontaktierungen.

4.1.3 Programmkonstruktion =====

4.1.3.1 Bestimmung der Nachfolger -----

In 3.4.1 wurde gezeigt, wie eine Verbindung als Verkettung von Zellen des Entwurfsrasters entsteht. Dabei wurden als Regeln für den Übergang von einem Punkt x zu einem Nachfolgepunkt x' genannt, daß der Übergang möglich (1) und zulässig (2) ist:

- (1) x' ist Nachfolger von x (vgl. 3.4.1)
- (2) $f(\bar{\Gamma}(x), \bar{\Gamma}(x'), E) = 'T'$

In der Zelldarstellung sind die möglichen Nachfolger einer Zelle x Elemente einer Untermenge der 1-Nachbarn von x . Eine Ausnahme macht der Startpunkt einer Verbindung: alle seine Nachbarn sind mögliche Nachfolger.

Die 1-Nachbarn einer Zelle x in einem Raster E sind diejenigen Zellen, die mit x über eine Rasterlinie verbunden sind, auf der es keine Zwischenpunkte gibt. Sei E das D127-Raster. Dann beschreiben die Lagevektoren $\vec{l}_1, \vec{l}_2, \dots, \vec{l}_8$ die acht möglichen Lagen, die zwei Punkte A und B mit den Koordinaten (x_a, y_a) und (x_b, y_b) zueinander haben können. Die Vektoren $\vec{l}_j$ haben die Komponenten $x = \text{sign}(x_b - x_a)$ und $y = \text{sign}(y_b - y_a)$ mit

$$\text{sign}(c) = \begin{cases} 1 & \text{für } c > 0 \\ 0 & \text{für } c = 0 \\ -1 & \text{für } c < 0 \end{cases} \quad (\text{vgl. Bild 22})$$

Sei $\vec{L}_x$ der der relativen Lage von x und seinem Vorgängerpunkt x' entsprechende Lagevektor. Dann sind als mögliche Nachfolger von x nur diejenigen Zellen x' zulässig, deren Lagevektor $\vec{L}_x$, skalar multipliziert mit $\vec{L}_x$ nicht negativ ist.

Beispiel: $\vec{L}_x = (1, 0)$

Zulässige Nachfolger sind die Punkte mit

$\vec{L}_x \cdot (1, 0)$ oder $(1, 1)$ oder $(0, 1)$ oder $(0, -1)$ oder $(1, -1)$.

Nicht zulässig sind dagegen Punkte mit

$\vec{L}_x \cdot (-1, -1)$ oder $(-1, 0)$ oder $(-1, 1)$.

Oder, etwas formeller ausgedrückt:

Sei NI_T die Indexmenge der 1-Nachbarn einer Zelle vom Typ T :

$$NI_T = \{i \mid i=1, 2, \dots, m\}$$

Wenn x der c -te Nachbar seines Vorgängers ist, dann sind als Nachfolger von x nur Nachbarn mit Indizes $k \in I$ zulässig:

$$I = \{k \mid k \in NI_T \wedge \vec{L}_x \cdot \vec{L}_x \geq 0\} \text{ mit } \vec{L}_x = \vec{l}_c \text{ und } \vec{L}_x = \vec{l}_k.$$

Die Nachfolgerfunktion NF_T liefert diese Indexmenge:

$$NF_T = \langle c, k \mapsto \begin{cases} i, i \in I \wedge (1 \leq k \leq n) \\ n, n \in NI_T \wedge k=0 \end{cases} \rangle$$

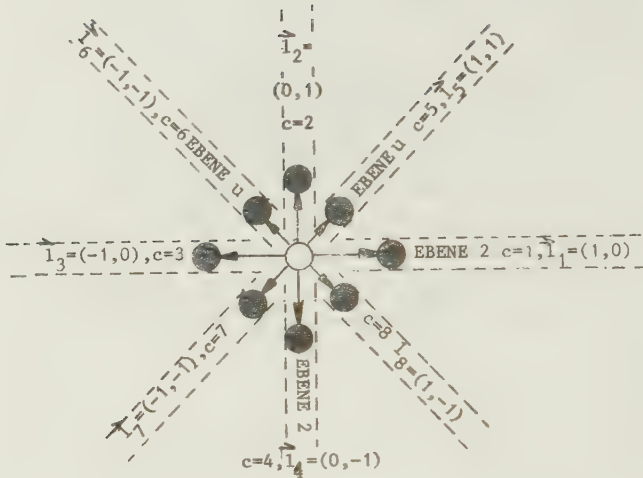


Bild 22: Ebenenzuordnung der Übergänge $x \rightarrow x'$ im D127-Raster:
 c ist der Index des Nachbarn $x' \in N(x)$.

Die relative Lage zweier Punkte x und x' ist durch den Wert von $d(x')$ gegeben. Sei c der Wert der Funktion d an der Stelle x' . Dann ist x' der c -Nachbar von x . Jedem c -Wert entspricht im Leiterraster eine Verschiebung zwischen den Punkten x und x' , deren Größe durch die Werte dx_c und dy_c gegeben ist. Analog dazu läßt sich eine Verschiebung dz_c angeben, die den Zellabstand im Entwurfsraster angibt. Durch das Einhalten von Vorzugsrichtungen in den beiden Leiterebenen ist jedem c -Wert ein Wert E zugeordnet, der die Ebene für den Übergang $x \rightarrow x'$ bezeichnet. Die Zellen sind zeilenweise durchnummeriert. Der Zellabstand in horizontaler Richtung ist damit 1, in allen anderen Richtungen ist er von der Anzahl der Zellen/Zeile abhängig.

	$c=1$	$c=2$	$c=3$	$c=4$	$c=5$	$c=6$	$c=7$	$c=8$
dx	2	0	-2	0	1	-1	-1	1
dy	0	2	0	-2	1	1	-1	-1
E	2	1	2	1	u	u	u	u

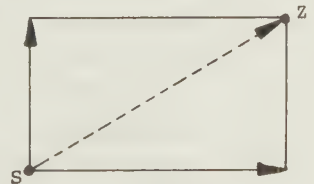
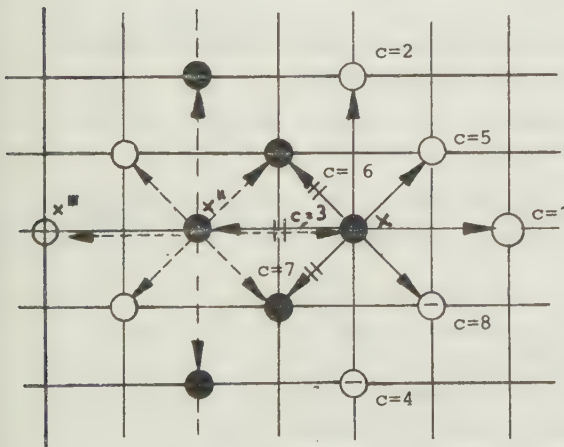
Beispiel: D127-Raster

Ein 'u' bei der Ebenenzuordnung bedeutet, daß der Übergang in beiden Ebenen erlaubt ist.

4.1.3.2 Richtungsbeschränkung und Bereichsbeschränkung bei der Konstruktion

Es ist wahrscheinlich, daß eine Verbindung zwischen zwei Punkten S und Z in dem den Punkten umschriebenen Rechteck gefunden wird (vgl. Kap. 6). Zwei Regeln für den Konstruktionsalgorithmus nutzen dies aus:

1. die Wegesuche beschränkt sich auf die Punkte des Entwurfsrasters, die in diesem Bereich liegen -
2. zur Fortsetzung einer virtuellen Leitung von Punkt x aus werden nur diejenigen Punkte x' berücksichtigt, deren Abstand zum Zielpunkt kleiner als der von x ist.



- Punkte, die von x'' adressiert werden könnten
- Punkte, die von x adressiert werden
- ⊖ Punkte, die von x wegen der relativen Lage von S und Z nicht adressiert werden dürfen

Bild 23: Verbotene (+) und erlaubte (-) Übergänge im D127-Raster

$d(x) = 1$; x'' ist Vorgänger von x . Der Vorgänger von x'' liegt links von x'' : x ist also der 1. Nachbar seines vorgängerpunktes x'' .

Sei $\vec{L}$ der Vektor, der die relative Lage von Startpunkt und Zielpunkt beschreibt. In Bild 23 ist $\vec{L}$ gegeben durch seine Komponenten (1,1).

Als mögliche Nachfolger einer Zelle x sind nur noch diejenigen x' zulässig, deren vektorielle Verweise $\vec{L}_x$, skalar multipliziert mit $\vec{L}$ positiv sind. Es verbleiben damit bei einer Konfiguration, wie sie in Bild 23 gegeben ist, von den acht rastergemäßen Nachbarn von x nur die Nachbarn mit den Indizes 5,1 und 2 als mögliche Nachfolger.

c	$\vec{L}_c$	$\vec{L} * \vec{L}_c$
1	(1,0)	1
2	(0,1)	1
3	(-1,0)	-1
4	(0,-1)	-1
5	(1,1)	1
6	(-1,1)	0
7	(-1,-1)	-2
8	(1,-1)	0

- . Bild 23 veranschaulicht das, denn der Nachbar mit Index $c = 3$ führt zu einer Schleife -
- . die Nachbarn mit Indizes 6,7 sind Zellen, die vom Vorgänger von x bereits adressiert werden konnten -
- . die Nachbarn mit den Indizes 4 und 8 sind Zellen, die keine Annäherung an den Zielpunkt erbringen.

Es werden acht Relativlagen von Startpunkt $S(x_s, y_s)$ und Zielpunkt $Z(x_z, y_z)$ unterschieden werden (Bild 24):

$$\begin{array}{l}
 \left. \begin{array}{l}
 xz > xs, yz > ys \rightarrow \text{Lage 1 (1. Quadrant)} \\
 xz > xs, yz < ys \rightarrow \text{Lage 2 (4. Quadrant)} \\
 xz < xs, yz > ys \rightarrow \text{Lage 3 (2. Quadrant)} \\
 xz < xs, yz < ys \rightarrow \text{Lage 4 (3. Quadrant)}
 \end{array} \right\} \vec{L}_x \cdot \vec{L} \stackrel{!}{>} 0 \\
 \left. \begin{array}{l}
 xz = xs, yz > ys \rightarrow \text{Lage 5 (obere Halbebene)} \\
 xz = xs, yz < ys \rightarrow \text{Lage 6 (untere Halbebene)} \\
 xz > xs, yz = ys \rightarrow \text{Lage 7 (rechte Halbebene)} \\
 xz < xs, yz = ys \rightarrow \text{Lage 8 (linke Halbebene)}
 \end{array} \right\} \vec{L}_x \cdot \vec{L} \stackrel{!}{\geq} 0
 \end{array}$$

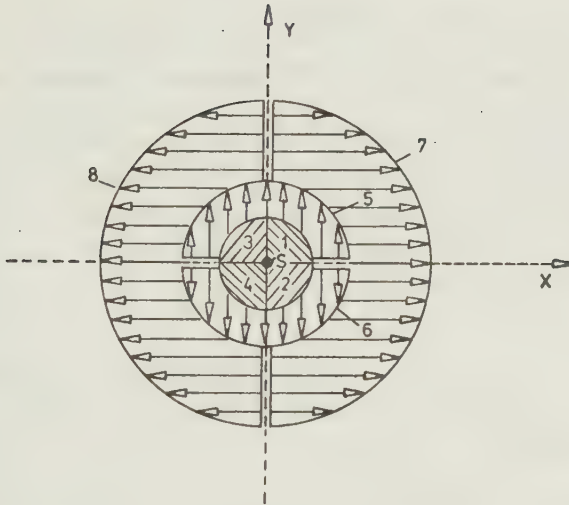


Bild 24: Definition von acht Relativlagen des Startpunktes $S(x_s, y_s)$ und des Zielpunktes $Z(x_z, y_z)$

Für das D127-Raster, Relativlage 1, reduzieren sich die Nachfolger beispielsweise wie folgt:

Nachfolger gemäß 4.1.3.1			Nachfolger mit Richtungsbeschränkung	
$d(x)$	Anz	$d(x')$	Anz*	$d^*(x')$
0	8	1,2,3,4,5,6,7,8	8	1,2,3,4,5,6,7,8 ⁺
1	5	1,5,8,2,4	3	1,5,2
2	5	2,5,6,1,3	3	1,5,2
3	5	3,6,7,2,4	1	2
4	5	4,7,8,1,3	1	1
5	2	1,2	2	1,2
6	2	2,3	1	2
7	2	3,4	0	
8	2	1,4	1	1

⁺ Für den Startpunkt einer Verbindung mit $d(S)=0$ gelten diese Beschränkungen nicht

4.1.3.3 Prioritätensteuerung

Die lokale Bewertung der Fortsetzung einer Leitung beeinflusst das Gesamtergebnis bei der Leiterführung entscheidend, da die Häufigkeit des Auftretens einer bestimmten Leiterstruktur an die Bewertung dieser Leiterstruktur gekoppelt ist (vgl. Kap. 6).

Die Bewertung ist abhängig von der Änderung des Richtungs_codes $d(x)$ und $d(x')$ vom Benutzer vorzunehmen, wobei i.a. zwischen drei Werten unterschieden wird (s. 7.4).

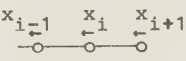
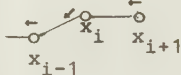
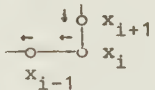
	Richtungs_codes	Bewertung
	$d(x_i) = d(x_{i-1})$	$G = 1$
	$d(x_{i-1}) = d(x_{i+1})$ $d(x_i) \neq d(x_{i-1})$	$G = 2$
	$d(x_{i-1}) = d(x_i)$ $d(x_{i+1}) \neq d(x_{i-1})$	$G = 3$

Bild 25: Bewertung von Übergängen $x_{i-1} \rightarrow x_i \rightarrow x_{i+1}$
in Abhängigkeit von Änderungen des Richtungs_codes.

4.1.4 Abbildung eines konstruierten Weges

Es werden die Abbildungsfunktionen r_x, r_y benützt und die Funktionen WL1 bis WL5, die den Wirkungsbereich von Leiterelementen und Durchkontaktierungen festlegen. Elektrische Eigenschaften können den Wirkungsbereich einer Leitung gegenüber dem geometrischen Wirkungsbereich erhöhen. Diese Eigenschaften können vom Modellalgorithmus bisher nicht verarbeitet werden.

Sie könnten aber, in eine 'geometrische' Formulierung übersetzt, als Zusatzregel in den Regelkatalog aufgenommen werden.

Folgende Prozeduren müssen rastertypabhängig programmiert werden:

LSETZE:	Setzen eines Leiterelements bei Zelle x in Ebene E
LLÖSCHE:	Löschen eines Leiterelements bei Zelle x in Ebene E
DKSETZE:	Setzen einer Durchkontaktierung bei Zelle x
DKLÖSCHE:	Löschen einer Durchkontaktierung bei Zelle x
ZIELSETZE:	Definition der Zielpunktmenge für eine Verbindung
ZIELLÖSCHE:	Löschen des Attributs 'Zielpunkt' für eine Zellmenge

Bei LSETZE und DKSETZE muß neben dem Belegungsstatus $\Gamma(x)$ der Zelle x das Potential des Weges eingeprägt werden, das bei den entsprechenden inversen Prozeduren LLÖSCHE und DKLÖSCHE wieder gelöscht wird.

Die Programmierung der Prozeduren erfolgt unter Verwendung der Prozeduren WL1 bis WL5 (3.1.4.1).

Die Prozeduren WL1 bis WL5 folgen direkt aus der Geometriedatei.

5. IMPLEMENTIERUNG

Der Konstruktionsalgorithmus ist rasterunabhängig und braucht beim Übergang auf ein neues Raster nicht verändert zu werden. Bei der Implementierung eines neuen Rasters sind folgende Arbeiten vorzunehmen:

A1: Definition der zu unterscheidenden Belegungszustände der Zellen des Entwurfsrasters -

- A2: Definition der Anzahl der Nachbarn n zu einer Zelle x -
 Zuordnung eines Richtungscode c für jeden der Nachbarn -
 Definition der Nachfolger x' zu einer Zelle x in Ab-
 hängigkeit von $d(x)$ -
 Bewertung des Übergangs $x \rightarrow x'$ in Abhängigkeit von
 der Änderung der Richtung. Dabei sind mindestens
 zwei Bewertungen zu unterscheiden:
- $G = 1$ für $d(x) = d(x')$ und
 $G = 2$ für $d(x) \neq d(x')$
- A3: Definition der Zulässigkeit $f(\uparrow(x), \uparrow(x'), E)$ der Übergänge -
- A4: Abbildungsfunktionen für die Übergänge:
 - Zelldarstellung in Rasterdarstellung
 - Rasterdarstellung in Koordinatendarstellung und
 die jeweiligen Umkehrfunktionen
- A5: Programmierung der rastertypabhängigen Prozeduren
 LSETZE, LÖSCHE, DKSETZE, DKLÖSCHE, ZIELSETZE, ZIELLÖSCHE

Die Abbildungsprozedur Rasterdarstellung $\rightarrow$ Koordinatendarstellung ergibt sich aus der Geometriedatei. Bei der Konstruktion und der Einbettung der virtuellen Leitungen in das L-Raster werden nur geometrische Randbedingungen berücksichtigt.

5.1 Raster mit konstanter Rastergitterweite

=====

5.1.1 Einheitsraster

=====

Als Einheitsraster werden alle Raster bezeichnet, die nur eine Rasterweite kennen. Dieser Rastertyp ist für einen Leiterplattenentwurf ungeeignet, da er impliziert, daß Leitungen und Durchkontaktierungen den gleichen Durchmesser haben (oder 'Wirkungsbereiche' für die Durchkontaktierungen berücksichtigt werden müßten).

5.1.1.1 A1: Definition der Belegungszustände

- s = 0 leer in beiden Ebenen
- s = 1 belegt in Ebene 1
- s = 2 belegt in Ebene 2
- s = 3 belegt in beiden Ebenen (mit Leitern oder eine Durchkontaktierung)
- s = 4 belegt in beiden Ebenen mit einem mechanischen Hindernis (der Kartenrand wird auf diese Weise definiert).

5.1.1.2 A2: Definition der Nachfolger x' einer Zelle x

a) Definition aller 1-Nachbarn

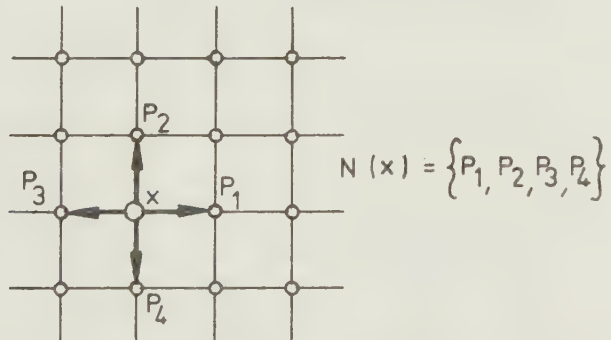


Bild 26: 1-Nachbarn zu Punkt x im Einheitsraster

Die Nachfolger von x werden in Abhängigkeit von d(x) als Untermenge der Indexmenge der 1-Nachbarn definiert.

b) Tabelle der Nachfolger und Bewertung des Übergangs $x \rightarrow x'$

Richtungscode $d(x)$	Richtungscode $d(x')$		Ebene von $x \rightarrow x'$
	$G = 1$	$G = 2$	
1	1	2,4	2
2	2	1,3	1
3	3	2,4	2
4	4	1,3	1

Dabei verweist $d(x)$ auf den Vorgänger von x , $d(x')$ auf x . G gibt die Bewertung des Übergangs an.

5.1.1.3 A3: Definition der Zulässigkeit des Übergangs $x \rightarrow x'$

$s_1 \backslash s_2$	0	1	2
0	T	F	T
1	F	F	F
2	T	F	T

$s_1 \backslash s_2$	0	1	2
0	T	T	F
1	T	T	F
2	F	F	F

a) $f(s_1, s_2, 1)$

b) $f(s_1, s_2, 2)$

Bild 27: Zulässigkeit der Übergänge $x \rightarrow x'$ im Einheitsraster in Abhängigkeit von $s_1 = \lceil(x)$ und $s_2 = \lceil(x')$

5.1.1.4 A4: Abbildungsfunktionen

Die Abbildungsfunktionen sind eindeutig.

Den Übergang von der Zelldarstellung des Entwurfsrasters in die Koordinatendarstellung des Leiterrasters leisten die Funktionen rx und ry. Den Übergang von der Rasterdarstellung in die Zelldarstellung die Funktion z, den Übergang von der Rasterdarstellung in die metrische Darstellung die Funktion k.

a) Zelle $\leftrightarrow$ Raster

Die Zellen sind zeilenweise durchnummeriert. Mit SP Rasterlinien in x-Richtung folgt:

$$z: \text{zelle} = \text{yr} * \text{SP} + \text{xr};$$

$$r_x: \text{yr} = \text{entier}(\text{zelle}/\text{SP});$$

$$r_y: \text{xr} = \text{zelle} - \text{yr} * \text{SP};$$

d.h. die Zelle mit Nummer zelle hat die Rasterkoordinaten xr, yr.

Dem Übergang $x \rightarrow x'$ entspricht in horizontaler Richtung der Zellabstand '1', in vertikaler Richtung der Zellabstand SP, mit SP=Anzahl der Rasterspalten.

b) Raster $\leftrightarrow$ mm-Einheiten

$$k_x: x = \text{xr} * g;$$

$$k_y: y = \text{yr} * g;$$

Richtungscode d(x)	Zellabstand dz	Rasterabstand	
		dx	dy
1	1	1	0
2	+SP	0	1
3	-1	-1	0
4	-SP	0	-1

5.1.2 D127-Raster =====

Nur den Rasterlinienschnittpunkten, deren Koordinatenwerte beide geradzahlig oder beide ungeradzahlig sind, entspricht eine Zelle des Entwurfsrasters. Das impliziert, daß an den restlichen Rasterpunkten keine Richtungsänderungen möglich sind. Damit kann die Zulässigkeit eines Übergangs $x \rightarrow x'$, die über diesen Punkt führt, allein durch Statusabfragen von x und x' entschieden werden.

Sei

- l die Leiterbreite
- DD der LötAugendurchmesser für Durchkontaktierungen
- DS der LötAugendurchmesser für Steckeranschlüsse
- DB der LötAugendurchmesser für Bausteinanschlüsse

dann sind zwei Varianten des Rasters denkbar:

Variante 1 -----

Gitterweite für Leiterraster: $1.27 \text{ mm} = g_l$
Gitterweite für D-Raster : 2.54 mm
 für SA-Raster : 2.54 mm
 für BA-Raster : $2.54 \text{ mm} = g_d$

Variante 2 -----

Gitterweiten analog Fall 1. Es gibt aber zwei D-Raster, die um den Rasterabstand g_l in x-Richtung und in y-Richtung gegeneinander verschoben sind. Dieses Raster wurde wegen der gegenüber Variante 1 verdoppelten Anzahl von Zellen, die Durchkontaktierungen zulassen, implementiert (vgl. Bild 19).

5.1.2.1 A1: Definition der Belegungszustände

- s = 0 leer in beiden Ebenen
- s = 1 belegt in Ebene 1
- s = 2 belegt in Ebene 2
- s = 3 belegt in beiden Ebenen mit Leitern
- s = 4 belegt mit Durchkontaktierung
- s = 5 belegt mit Steckeranschluß oder Bausteinanschluß
- s = 7 belegt mit mechanischem Hindernis

Zusätzlich können für bestimmte, vom Benutzer zu definierende Bereiche, Sperrvermerke für Zellen gesetzt werden:

- SV = 0 Zelle hat ein Abbild im D-Raster, d.h. an dieser Stelle kann eine Durchkontaktierung gesetzt werden $\rightarrow$ Zelltyp A, SX(c)=0
- SV = 1 Zelle hat kein Abbild im D-Raster, eine Durchkontaktierung (d.h. Richtungswechsel um 90 Grad) ist an dieser Stelle nicht möglich $\rightarrow$ Zelltyp B, SX(c)=1

5.1.2.2 A2: Definition der Nachfolger einer Zelle

a) Definition aller 1-Nachbarn von x

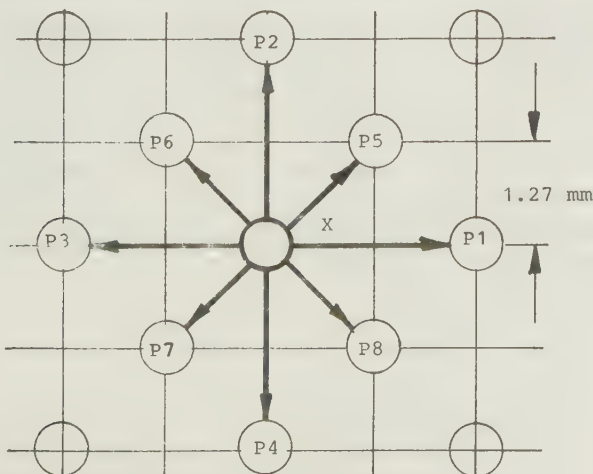


Bild 28: 1-Nachbarn zu x im D127-Raster

$$N(x) = \langle P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 \rangle$$

b) Tabelle der Nachfolger und Bewertung des Übergangs

Richtungscode $d(x)$	Richtungscode $d(x')$			Ebene $x \rightarrow x'$
	$G = 1$	$G = 2$	$G = 3$	
1	1	5,8	2,4	2
2	2	5,6	1,3	1
3	3	6,7	2,4	2
4	4	7,8	1,3	1
5	-	1,2	-	u
6	-	2,3	-	u
7	-	3,4	-	u
8	-	4,1	-	u

Bei Ebene = u ist die Ebenenzuordnung noch nicht festgelegt. Die Bewertung G kann durch eine Regel aus dem Regelkatalog modifiziert werden, die besagt, daß das Umfahren eines Hindernisses mit zwei diagonalen Wegelementen wie eine geradlinige Fortsetzung der Leitung, also mit $G = 1$ bewertet wird.

5.1.2.3 A3: Zulässigkeit des Übergangs

$s_1 \backslash s_2$	0	1	2
0	T	F	T
1	F	F	F
2	T	F	T

a) $f(s_1, s_2, 1)$

$s_1 \backslash s_2$	0	1	2
0	T	T	F
1	T	T	F
2	F	F	F

b) $f(s_1, s_2, 2)$

$s_1 \backslash s_2$	0	1	2
0	T	T	T
1	T	T	F
2	T	F	T

c) $f(s_1, s_2, u)$

Bild 29: Zulässigkeit der Übergänge $x \rightarrow x'$ im D127-Raster in Abhängigkeit von $s_1 = \lceil(x)$ und $s_2 = \lceil(x')$ und der Ebene. Die Spalten mit $s_2 > 2$ sind nicht aufgeführt, da sie immer den Wert F liefern.

Diese Tabellen gelten nur für den Fall, daß alle Zellen vom Typ A sind. Für Zellen vom Typ B gilt eine Zusatzbedingung, die besagt, daß eine Fortsetzung mit $G > 2$ an Zellen mit $SZ(x)=1$ nicht möglich ist:

$$f'(s_1, s_2, E) = \begin{cases} f(s_1, s_2, E) \wedge G < 3 \text{ für } t(x)=B \text{ bzw. } SZ(x)=1 \\ f(s_1, s_2, E) \end{cases}$$

5.1.2.4 A4: Transformationsvorschrift

Richtungscode d(x)	Zellabstand dz	Rasterabstand	
		dx	dy
1	2 DX	2	0
2	2 DY	0	2
3	- 2 DX	-2	0
4	- 2 DY	0	-2
5	DX + DY	1	1
6	-DX + DY	-1	1
7	-DX - DY	-1	-1
8	DX - DY	1	-1

Der Zellabstand DX und DY wird mit der Funktion z aus den Rasterabständen ausgerechnet: $DX = 1$, $DY = \overline{SP}$.

Die Transformationsformel ist gegenüber dem Einheitsraster komplizierter, da die Anzahl der Zellen in den Rasterzeilen unterschiedlich ist.

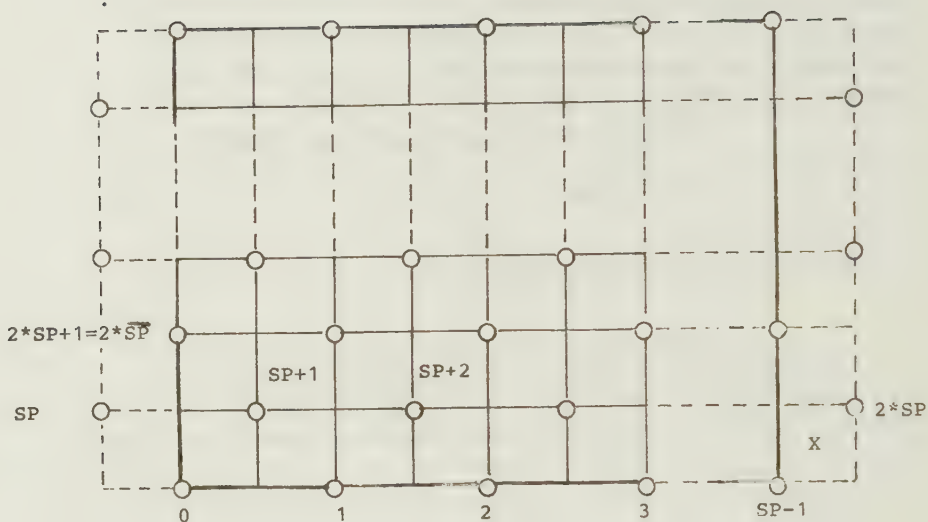


Bild 30: Zellnummernberechnung bei nicht konstanter Anzahl von Zellen/Zeile

Mit dem Mittelwert $\overline{SP}$ der Zellanzahlen in geraden und ungeraden Rasterzeilen erhält man eine Abbildungsvorschrift, die eine eindeutige Zuordnung zwischen Zellabständen dz_c und Rasterabständen dx_c und dy_c liefert. Die Zellnummern $SP, 2*SP, \dots$ dürfen nicht adressiert werden, da sie außerhalb der LP liegen.

$$\begin{aligned}
 z: \text{ zelle} &= \text{yr} * \overline{SP} + x/2; \text{ mit } \overline{SP} = \frac{SP+SP+1}{2} \\
 r_y: \text{ yr} &= \text{entier} (\text{zelle}/\overline{SP}) \\
 r_x: \text{ xr} &= 2 * (\text{zelle} - \text{yr} * \overline{SP}) \\
 k_x: \text{ x} &= \text{xr} * g1 \div \text{xr} = \text{x}/g1 \\
 k_y: \text{ y} &= \text{yr} * g1 \div \text{yr} = \text{y}/g1
 \end{aligned}$$

5.1.3 D635-Raster =====

In diesem Raster kann bei gleichen geometrischen Bedingungen entworfen werden wie beim D127-Raster. Durch die erhöhte Leiterdichte (Rasterabstand im L-Raster = 0.635 mm) werden jedoch bei der Abbildung eines Weges in das L-Raster nicht nur die der Zelle entsprechenden Punkte im L-Raster und im D-Raster beeinflusst, sondern auch der angrenzende Bereich.

Für die Rasterweiten gilt:

Rasterweite im L-Raster = 0.635 mm

Rasterweite im D-Raster = 1.27 mm (evtl. zwei gegeneinander verschobene Raster)

Rasterweite im BA-Raster = 2.54 mm

Rasterweite im SA-Raster = 2.54 mm

5.1.3.1 A1: Definition der Belegungszustände

analog zum D127-Raster

5.1.3.2 A2: Definition der Nachfolger

a) Definition der Nachbarn

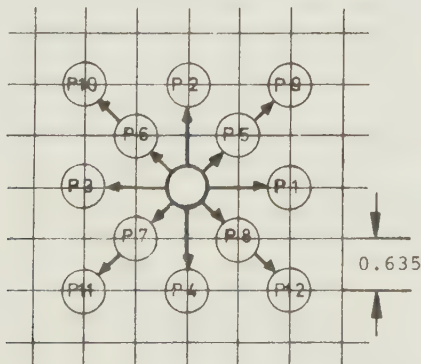


Bild 31: Nachbarn einer Zelle x im D635-Raster

$N(x) = \langle P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8, P9, P10, P11, P12 \rangle$

1-Nachbarn sind die Zellen P1 - P8, 2-Nachbarn die Zellen P9 - P12.

b) Nachfolger von x und Bewertung der Übergänge $x \rightarrow x'$

Richtungscode $d(x)$		Richtungscode $d(x')$			Ebene $x \rightarrow x'$
		G=1	G=2	G=3	
	0	1,2,3,4	9,10,11,12	-	
→	1	1	5,8	2,4	2
↑	2	2	6,5	3,1	1
←	3	3	7,6	2,4	2
↓	4	4	8,7	3,1	1
↗	5	-	1,2	-	u
↖	6	-	2,3	-	u
↘	7	-	3,4	-	u
↙	8	-	4,1	-	u
↗	9	-	1,2	-	u
↖	10	-	2,3	-	u
↘	11	-	3,4	-	u
↙	12	-	4,1	-	u

Die Richtungscode mit einem Wert > 8 werden vom Konstruktionsprogramm benutzt, um aus dem Wirkungsbereich der Bausteinanschlüsse beim Start herauszukommen (vgl. Bild 21).

5.1.3.3 A3: Zulässigkeit der Fortsetzung

analog wie bei Raster D127

5.1.3.4 A4: Transformationsvorschrift

d(x)	Zellabstand dz	Rasterabstand		mm
		dx	dy	
1-4	analog D127-Raster....			1.27
5-8	analog D127-Raster....			0.9
9	2 DX + 2 DY	2	2	1.8
10	-2 DX + 2 DY	-2	2	1.8
11	-2 DX - 2 DY	-2	-2	1.8
12	2 DX - 2 DY	2	-2	1,8

Die Transformationsregeln für die Abbildung zwischen den Darstellungen sind analog zum D127-Raster.

Die Anzahl der Zellen im Entwurfsraster vervierfacht sich gegenüber diesem Raster bei gleichen Abmessungen, der 'Vorschub' beim Übergang auf den Nachfolgerpunkt halbiert sich. Das D635-Raster sollte daher nur dann benützt werden, wenn die zu erwartende Leiterdicke dies notwendig macht.

5.1.3.5 Wirkungsbereich von Leitungen und Durchkontaktierungen

a) Leiterelement bei x

Punkte, die auf Rasterlinien unmittelbar an das Leiterelement angrenzend liegen, sind für Durchkontaktierungen zu sperren:

$$WL1(x) = C1; \forall x', x' \in C1: SZ(x') = 1$$

b) Durchkontaktierung bei x

Zellen im Wirkungsbereich der Durchkontaktierung sind für Leiterelemente und Durchkontaktierungen zu sperren:

$$WL3(x)=C3 ; \forall x', x' \in C3: SZ(x') = 1;$$

$$WL2(x)=C2 ; \forall x', x' \in C2: \lceil (x') = 3.$$

Zellen außerhalb dieses Bereiches sind für Durchkontaktierungen zu sperren, falls sich sonst deren Wirkungsbereich mit dem Wirkungsbereich der Durchkontaktierung bei x überlappen würde:

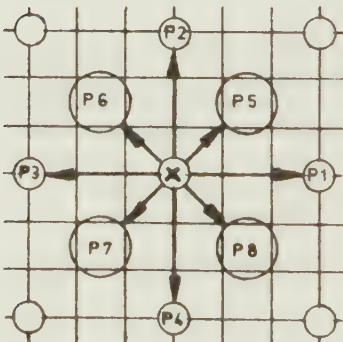
$$WL3(x')=C3' ; \forall x'', x'' \in C3': SZ(x'') = 1.$$

Die Mengen C1, C2 und C3 werden durch Anwendung der Funktionen WL1, WL2 und WL3 auf x bzw. x' gebildet (vgl. 3.1.4.1). Bausteinanschlüsse und Steckeranschlüsse werden wie Durchkontaktierungen behandelt.

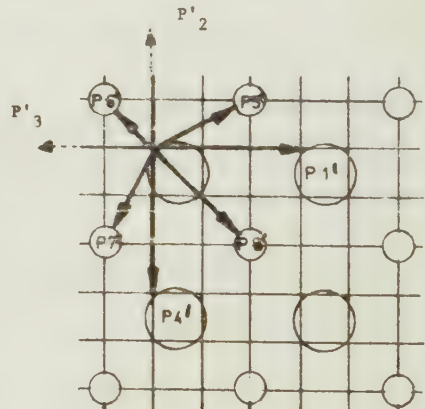
5.2 Raster mit variabler Rastergitterweite: DU-Raster
=====

Es soll das DU-Raster von 4.2.1 betrachtet werden

a) 1-Nachbarn zu x



a) $t(x) = A$



b) $t(x) = B, P(x) = 01$

Bild 32: 1-Nachbarn von x im DU-Raster

Zelltyp B = 

Zelltyp A = 

$N(x) = \langle P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8 \rangle$

Als Gitterweite sind gegeben:

Gitterweite für L-Raster:	$l_1 = 0.5, l_2 = 1.02$ bzw. $l_1 = 0.6, l_2 = 0.97$
Gitterweite für D-Raster:	2.54 mm (evtl. 2 Raster)
Gitterweite für BA-Raster:	2.54 mm
Gitterweite für SA-Raster:	2.54 mm

Wesentliche Unterschiede zu den in den vorigen Abschnitten besprochenen Rastertypen sind:

1. Die Gitterweite im L-Raster ist nicht konstant .
2. Falls zwei gegeneinander verschobene D-Raster I und II verwendet werden, liegen die Durchkontaktierungen des Rasters II nicht mehr auf Rasterlinienschnittpunkten des L-Rasters.
3. Es sind zwei Zelltypen A und B zu unterscheiden (Bild 32): Die Funktion t liefert den Zelltyp.
4. In Zellen x mit $t(x)=B$ müssen Positionen unterschieden werden. Mögliche Positionen sind: $\{u, l, o, r\}$.
Die Funktion P liefert die Positionen innerhalb einer Zelle x in Ebene 1 (p_1) und Ebene 2 (p_2): $P(x) = (p_2, p_1)$.

5.2.1 A1: Definition von Belegungszuständen =====

a) Zelltyp B

Bei der Belegung der Zellen durch Leiter sind 16 verschiedene Zustände zu unterscheiden:

Ebene 1 (senkrechte Verzugsrichtung):
 rechts (nicht) belegt: $r(\bar{r}) \rightarrow \text{Bit } 1 = 1(0)$
 links (nicht) belegt: $l(\bar{l}) \rightarrow \text{Bit } 2 = 1(0)$

Ebene 2 (waagrechte Vorzugsrichtung):
 unten (nicht) belegt: $u(\bar{u}) \rightarrow \text{Bit } 3 = 1(0)$
 oben (nicht) belegt: $o(\bar{o}) \rightarrow \text{Bit } 4 = 1(0)$

b) Zelltyp A

Es gibt nur vier Zustände:

s = 0000 ($\bar{u}\bar{r}$)

s = 0001 ($\bar{u}r$)

s = 0100 ($u\bar{r}$)

s = 0101 (ur)

Vier weitere Zustände beschreiben die Belegung mit Durchkontaktierungen und Hindernissen:

s = 16 belegt mit Durchkontaktierung

s = 18 belegt mit Bausteinanschluß

s = 19 belegt mit Steckerkontaktpunkt

s = 31 belegt mit mechanischem Hindernis

Zusatzinformation zur Unterscheidung des Zelltyps

T = A Zelltyp A } die Funktion t liefert den Zelltyp
T = B Zelltyp B

5.2.2 A2: Definition der Nachfolger einer Zelle

=====

Die Definition der Nachbarn einer Zelle x ist abhängig vom Zelltyp.

a) t(x) = A (Bild 33)

Nachbarn vom Zelltyp A :

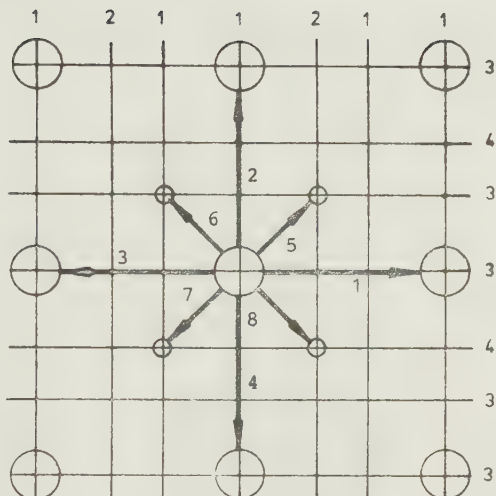
NAA = < P1, P2, P3, P4 >

Nachbarn vom Zelltyp B :

NAB = < P5, P6, P7, P8 >

$$t(x) = A; \quad t(x') = B$$

		EBENE 1		EBENE 2	
CODE		X	X'	X	X'
→	1	—	—	3	3
↑	2	1	1	—	—
↖	3	—	—	3	3
↓	4	1	1	—	—
↗	5	1	2	3	3
↘	6	1	1	3	3
↖	7	1	1	3	4
↘	8	1	2	3	4



"Vorgänger": x mit $t(x) = A$

"Nachfolger" $X' = \{c \mid t(c) = A \wedge c \in NAA\} \cup \{c \mid t(c) = B \wedge c \in NAB\}$

Bild 33: Nachbarn einer Zelle vom Typ A

Die Tabelle gibt an, welche Bitpositionen in x bzw.

x' nicht belegt sein dürfen, damit der Übergang $x \rightarrow x'$ zulässig ist

- die Belegung dieser Position ist irrelevant

$\bar{n}$ die Position n darf nicht belegt sein.

b) $t(x) = B$ (Bild 34 und 35)

Nachbarn vom Zelltyp B:

$$\text{NBB} = \langle P1', P2', P3', P4' \rangle$$

Nachbarn vom Zelltyp A:

$$NBA = \langle P5', P6', P7', P8' \rangle$$

Die Berechnung der Änderung der Ortskoordinaten beim Übergang auf die Nachbarzelle ist bei $t(x)=B$ von der Position in x abhängig (vgl. Tabelle).

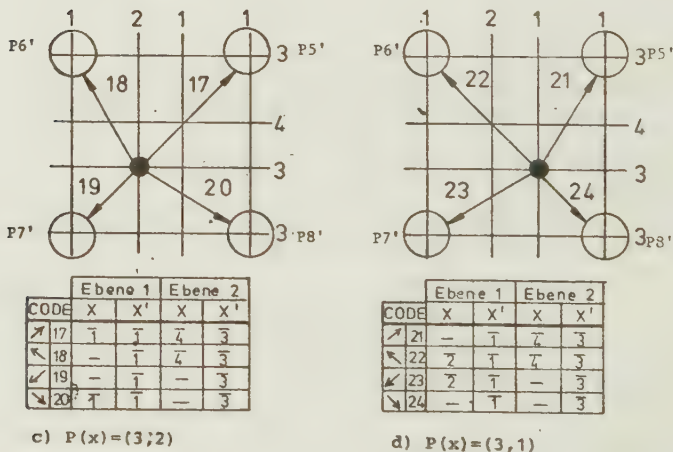
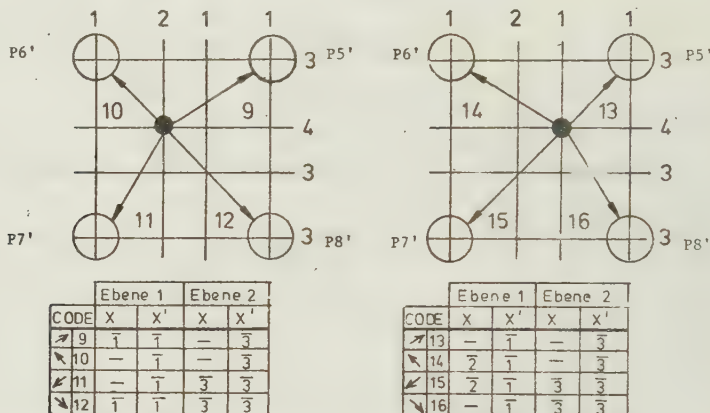
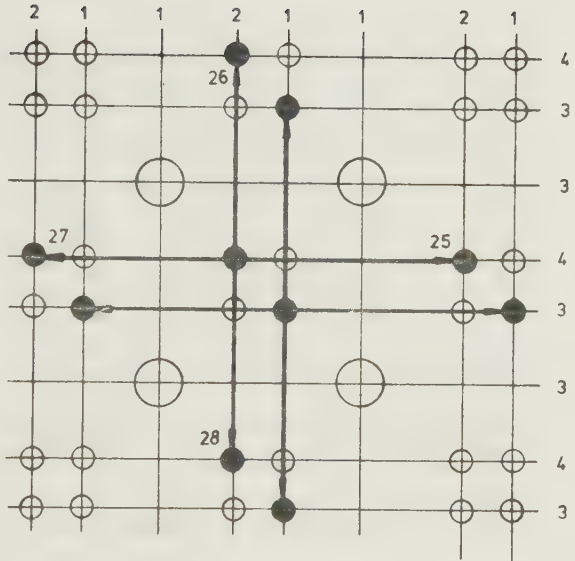


Bild 34: Nachbarn einer Zelle x mit $t(x)=B$ und $t(x')=A$ (vgl. Bemerkung zu Bild 33)

- a) Position in $x = ol \hat{=} (4,2)$
- b) Position in $x = or \hat{=} (4,1)$
- c) Position in $x = ul \hat{=} (3,2)$
- d) Position in $x = ur \hat{=} (3,1)$

$t(x) = B, t(x') = B$

POS	CODE	Ebene 1		Ebene 2	
		X	X'	X	X'
(4,2)	→ 25	—	—	4	4
	↑ 26	2	2	—	—
	← 27	—	—	4	4
	↓ 28	2	2	—	—
(4,1)	→ 29	—	—	4	4
	↑ 30	1	1	—	—
	← 31	—	—	4	4
	↓ 32	1	1	—	—
(3,2)	→ 33	—	—	3	3
	↑ 34	2	2	—	—
	← 35	—	—	3	3
	↓ 36	2	2	—	—
(3,1)	→ 37	—	—	3	3
	↑ 38	1	1	—	—
	← 39	—	—	3	3
	↓ 40	1	1	—	—



"Vorgänger" x mit $t(x) = B$

"Nachfolger" $X' = \{c' \mid t(c') = B, c' \in NBB\} \cup NAB$

Die Ziffern an den Rasterlinien bezeichnen die Position in der Zelle.
Bei Zellen vom Typ A gibt es nur die Position (3,1).

Bild 35: Nachbarn einer Zelle x mit $t(x) = B$ und $t(x') = B$
(vgl. Bemerkung zu Bild 33)

b) Tabelle der Nachfolger mit Bewertung

Es ist zu unterscheiden zwischen den Zelltypen A und B. Der Zelltyp A verhält sich ähnlich den Zellen im D127-Raster.

Es gibt zu jedem x maximal acht mögliche Nachfolger x'
Diese Nachfolger sind vom Zelltyp A in den achsparallelen Richtungen und vom Zelltyp B in den diagonalen Richtungen.

Bei Zellen vom Typ B müssen vier Positionen unterschieden werden (Bild 35): die Position ul, ur, or und ol.

Position $P(x)$	Nachfolger in Richtung der x- oder y-Achse $t(x') = B$				Nachfolger in Richtung von Rasterdiagonalen $t(x') = A$			
*	1'	2'	3'	4'	5'	6'	7'	8'
ol	25	26	27	28	9	10	11	12
or	29	30	31	32	13	14	15	16
ul	33	34	35	36	17	18	19	20
ur	37	38	39	40	21	22	23	24
	→	↑	←	↓	↗	↘	↙	↖

* die in dieser Zeile aufgeführten Werte verweisen auf die entsprechenden Richtungscode von Zellen mit $t(x) = A$.

Mögliche Nachfolger eines Punktes vom Zelltyp A sind

	Richtungscode $d(x)$	Richtungscode $d(x')$			Ebene $x \rightarrow x'$
		G = 1	G = 2	G = 3	
$t(x') = A$	1	1	5,8	2,4	2
	2	2	6,5	3,1	1
	3	3	7,6	2,4	2
	4	4	8,7	3,1	1
$t(x') = B$	9,13,17,21	-	1V2		*
	10,14,18,22	-	2V3		*
	11,15,19,23	-	3V4		*
	12,16,20,24	-	4V1		*

* Beim Übergang ist kein Ebenenwechsel erlaubt, falls $SZ(x)=1$

Mögliche Nachfolger eines Punktes x vom Zelltyp B sind:

Position $P(x)$	Richtungs- code $d(x)$	Richtungscode $d(x')$			Ebene von $x \rightarrow x'$
		$G = 1$	$G = 2$	$G = 3$	
ol	25	25	9,12	entfällt i.a. da bei Zelltyp B keine DK's möglich sind	2
	26	26	9,10		1
	27	27	10,11		2
	28	28	11,12		1
or	29	29	13,16	keine DK's möglich sind	2
	30	30	13,14		1
	31	31	14,15		2
	32	32	15,16		1
ul	33	33	17,20		2
	34	34	17,18		1
	35	35	18,19		2
	36	36	19,20		1
ur	37	37	21,24		2
	38	38	21,22		1
	39	39	22,23		2
	40	40	23,24		1

5.2.3 A3: Zulässigkeit des Übergangs

=====

Die Übergangsfunktion f muß in Abhängigkeit vom Zelltyp $t(x)$ und $t(x')$, vom Richtungscode $d(x')$, der Position $p_E = P(x)$ und $p'_E = P(x')$ und den jeweiligen Statuswerten an diesen Positionen definiert werden.

Bei $t(x)=A$ gibt es in jeder Ebene nur eine Position, das wird durch ein leeres Komma in den Formeln für f angedeutet.

Die Funktion Γ_1 ist folgendermaßen definiert:

$$\Gamma_1(x,p) = \begin{cases} 1 & \text{Zelle } x \text{ in Position } p \text{ belegt} \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Drei Fälle sind zu unterscheiden:

$$1. \underline{t(x)} = \underline{t(x')}, \underline{P(x)} = \underline{P(x')} = \underline{P} \text{-----}$$

$$f(s_1, s_2, p, p') = \neg \Gamma_1(x, p) \wedge \neg \Gamma_1(x', p) = 0$$

$$2. \underline{t(x)} = \underline{A}, \underline{t(x')} = \underline{B}$$

$$f(s_1, s_2, p, p') = \neg \Gamma_1(x, p) \wedge \neg \Gamma_1(x', p') = 0$$

wobei $P(x')$ durch $d(x')$ und die dem Übergang zugeordnete Ebene E bestimmt ist.

$$E = 1: P(x') = 1 \text{ für } d(x') = 5 \text{ oder } 8$$

$$P(x') = r \text{ für } d(x') = 6 \text{ oder } 7$$

$$E = 2: P(x') = u \text{ für } d(x') = 5 \text{ oder } 6$$

$$P(x') = o \text{ für } d(x') = 7 \text{ oder } 8$$

$$3. \underline{t(x)} = \underline{B}, \underline{t(x')} = \underline{A}$$

$$f(s_1, s_2, p, p') = \neg \Gamma_1(x', p) \wedge \neg \Gamma_1(x, p) = 0$$

Die folgende Tabelle zeigt die Bitpositionen, die für den Übergang $x \rightarrow x'$ zu prüfen sind. Dabei sind bei x die Positionen nicht aufgeführt, die in der betrachteten Ebene frei sein mußten, um x selbst zu erreichen.

Beispiel: $d(x) = 26$

$$d(x') = 26, 9 \text{ oder } 10$$

$d(x) = 26$ impliziert, daß die Position '2' in x frei sein muß. Für den Übergang nach x' mit $d(x')=9$ muß nur die Position '1' in x abgefragt werden. Bei $d(x') = 10$ kann die Abfrage nach dem Belegungsstatus von x entfallen, da $P(x)=-$, für den Übergang mit $d(x')=26$ muß die Position 2 in x' abgefragt werden.

$d(x')$	$P(x)$		$P(x')$	
	E=1	E=2	E=1	E=2
1-4	1	3	1	3
5	1	3	2	3
6	1	3	1	3
7	1	3	1	4
8	1	3	2	4
9	1	-	1	3
10	-	-	1	3
11	-	3	1	3
12	1	3	1	3
13	-	-	1	3
14	2	-	1	3
15	2	3	1	3
16	-	3	1	3
17	1	4	1	3
18	-	4	1	3
19	-	-	1	3
20	1	-	1	3
21	-	4	1	3
22	2	4	1	3
23	2	-	1	3
24	-	-	1	3
25,27	-	4	-	4
26,28	2	-	2	-
29,31	-	4	-	4
30,32	1	-	1	-
33,35	-	3	-	3
34,36	2	-	2	-
37,39	-	3	-	3
38,40	1	-	1	-

5.2.4 Transformationsvorschrift

=====

Der Zellabstand zum Nachfolger ist für Zelltyp A und B gleich.
Der Rasterabstand hängt vom Zelltyp und bei $t(x) = B$ von der Position in x ab (vgl. Tabelle: $u \neq$ unbestimmt).

Richtungscode $d(x')$	Zellabstand dz	Rasterabstand		mm
		dx	dy	
1,25,29,33,37	2 DX1	3	0	2.54
2,26,30,34,38	2 DY1	0	3	2.54
3,27,31,35,39	-2 DX1	-3	0	2.54
4,28,32,36,40	-2 DY1	0	-3	2.54
5	DX1 + DY1	1	1	u
6	-DX1 + DY1	-1	1	u
7	-DX1 - DY1	-1	-1	u
8	DX1 - DY1	1	-1	u
9	wie 5 - 8	2	1	u
10		-1	1	u
11		-1	-2	u
12		2	-2	u
13	wie 5 - 8	1	1	u
14		-2	1	u
15		-2	-2	u
16		1	-2	u
17	wie 5 - 8	2	2	u
18		-1	1	u
19		-1	-1	u
20		2	-1	u
21		1	2	u
22		-2	2	u
23		-2	-1	u
24		1	-1	u

Bei diesem Raster gibt es in Abhängigkeit von Leiterbreiten, Mindestabständen und dem Durchmesser von Durchkontaktierungen verschiedene Möglichkeiten, die Relation zwischen den Rasterlinienabständen im L-Raster dx_1 und dx_2 festzusetzen: die Summe der Abstände muß 2.54 mm betragen. Die Abbildungsfunktionen zwischen Zelldarstellung und Rasterdarstellung sind für Zellen vom Typ A analog zu den für das Raster D127 angegebenen Formeln formulierbar mit der Substitution $x' = 3/2 x$; $y' = 3/2 y$.

Eine einheitliche Formel für beide Zelltypen ist im folgenden in ALGOL-Notation gegeben:

```
'comment' Umrechnung Koordinaten → Zelle
      Eingabe: Rasterkoordinaten xr, yr
      Ausgabe: Zellnummer z;
h      : entier(yr/3); rest := y-h*3;
z0     : 'if' rest=0 'then' 2*h* $\overline{SP}$  'else' (2*h+1)* $\overline{SP}$ ;
z      : =z0 + entier (xr/3);
'comment' Umrechnung Zelle → Rasterkoordinaten:
      Eingabe: Zellnummer z
      Ausgabe: Rasterkoordinaten xr, yr;
h      := z / (2* $\overline{SP}$ );
'if' t(z)=b 'then' zelle:=z- $\overline{SP}$  'else' zelle:=z;
yr     := h * 3;
xr     := (zelle - h*2* $\overline{SP}$ )*3;
'if' t(z) =b 'then' 'begin' xr:=xr+1; yr:=yr+1; 'end';
```

Für Zelltyp B wird dabei die Koordinate für die Position 'ul' berechnet.

Unter $\overline{SP}$ ist wieder der Mittelwert aus der Zellenanzahl/Zeile zu verstehen. Die Transformationsvorschrift für den Übergang von der Rasterkoordinatendarstellung in die mm-Koordinatendarstellung ist wegen der nicht äquidistanten Rasterabstände etwas komplizierter als beim D127-Raster (vgl. Bild 7).

Sei DX_1 der größere Rasterabstand (Durchkontaktierung $\leftrightarrow$ Leiter) und DX_2 der kleinere Rasterabstand (Leiter $\leftrightarrow$ Leiter), dann gilt:

$$dx_1 = dx_3 = DX_1$$

$$dx_2 = DX_2$$

$$D = dx_1 + dx_2 + dx_3 = 2.54 \text{ [mm]}$$

Die Periode n des Rasters ist 3. Damit berechnet sich die x -Koordinate eines Punktes $P(x_r, y_r)$ im L-Raster zu

$$x = qx \cdot D + \sum_{i=1}^{zx} dx_i \text{ mit } qx = \text{entier}(x_r/3) \text{ und } zx = x_r - qx \cdot 3$$

Die y -Koordinate lässt sich analog berechnen.

5.3 Überarbeitung des Entwurfs

=====

Unabhängig vom gewählten Raster typ werden bei der Konstruktion von Verbindungen Vorzugsrichtungen eingehalten, die nur in Richtung der Rasterdiagonalen (bzw. den entsprechenden Übergängen im DU-Raster) durchbrochen werden dürfen. Es entstehen dann unnötige Ebenenwechsel, wenn ein Leitersegment einer Verbindung, die aus mehreren Segmenten besteht, nicht von einem Leitersegment in der anderen Ebene gekreuzt wird.

Ob ein Leitersegment gekreuzt wird, ist bei Raster typen, bei denen nicht jedem Rasterlinienschnittpunkt des Leiterrasters eine Zelle im Entwurfsraster entspricht, nicht allein aus der Abfrage nach dem Belegungsstatus der Zellen, die auf dem Leitersegment liegen, entscheidbar. Diese Abfragen liefern nur die "direkten Kreuzungen".

"Indirekte" Kreuzungen entstehen, wenn dem Schnittpunkt der beiden Leitersegmente keine Zelle im Entwurfsraster entspricht. Bild 36 zeigt eine direkte und indirekte Kreuzung im D127-Raster.

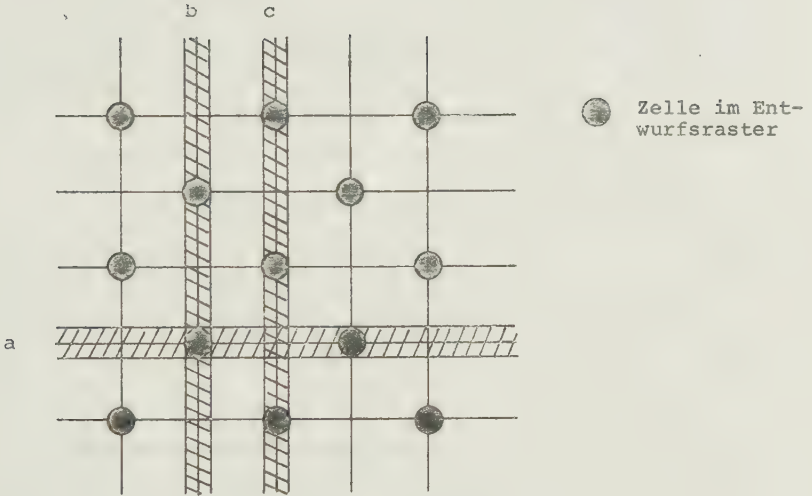


Bild 36: Direkte und indirekte Kreuzungen

Das Leitersegment a wird vom Segment b direkt gekreuzt, von Segment c indirekt

Sei das die Punkte A und B verbindende Leitersegment a beschrieben durch die Folge der Zellen im Entwurfsraster

$$a = \langle c_0 = A, c_1, c_2 \dots c_{n-1}, c_n = B \rangle,$$

durch die Ebenenzugehörigkeit entsprechend seiner Richtung:

E = 1 für vertikale Segmente

E = 2 für horizontale Segmente

und die Signalzugehörigkeit $Q = q_E(A)$.

Sei die Funktion f_2 folgendermaßen definiert:

$$f_2(c, E) = \begin{cases} 1 & c \text{ in Ebene } E \text{ belegt} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Dann ist das Kriterium für eine direkte Kreuzung:

Es existiert mindestens eine Zelle $c_j \in a$ mit $\Gamma_2(c_j, E_A) = 1$ und $q_{E_A}(c_j) \neq Q$; $E_A = 3 - E$.

Das Kriterium für eine indirekte Kreuzung von a ist:

Es existiert ein Paar von Zellen n_j und n_k auf einer Rasterlinie senkrecht zum Leitersegment, für das gilt

$$n_j, n_k \in N(c_j); c_j \in a; \\ (\Gamma_2(n_j, E_A) = \Gamma_2(n_k, E_A)) \wedge t(n_j) = B \wedge \Gamma_2(n_j, E_A) \neq 0$$

oder

$$(q_{E_A}(n_j) = q_{E_A}(n_k) \wedge q_{E_A}(n_j) \neq Q \wedge q_{E_A}(n_j) \neq 0) \wedge t(n_j) = A$$

6. ERGEBNISSE

Programme zur Entwurfsautomatisierung sollen den Konstrukteur von Routinearbeiten entlasten. Die Grenzen der Automatisierbarkeit werden bei besonderen Anforderungen deutlich. Diese Anforderungen können elektrisch bedingt sein (wenn beispielsweise ein zeitkritisches Signal eine besonders kurze Leiterführung verlangt) oder konstruktiver Art sein (wenn beispielsweise auf der Leiterplatte trotz dichter Bestückung noch Platz frei von Leitungen gehalten werden muß).

Mit dem Modellalgorithmus wird eine flexible Anpassung an den Schwierigkeitsgrad durch ein benutzerdefiniertes Raster, einen parametrisierten Regelkatalog und eine programmierbare Prioritätenrangfolge der Konstruktionsregeln erreicht.

Leiterplatten mit geringer Packungsdichte (Platzangebot für einen 14-poligen integrierten Baustein nicht weniger als 6 cm^2 entsprechend 12×22 Rasterlinien im D127-Raster, etwa 70 % der Einbauplätze belegt) werden in einem groben Raster unter starker Reduzierung der Freiheitsgrade beim Entwurf der einzelnen Verbindungen entworfen. Leiterplatten mit hoher Packungsdichte werden in einem feineren Raster mit einem größeren Satz von Regeln

und gestufter Anwendung von Restriktionen in aufeinanderfolgenden Konstruktionsläufen entworfen. Erst wenn keine vollständige Entflechtung der Leiterführung in zwei Ebenen möglich ist, wird ein weiteres Ebenenpaar für die Leiterführung benützt.

Die Bewertung des Modellalgorithmus soll anhand von zwei Kriterien versucht werden.

1. Abschätzung des Aufwands (Rechenzeit, Speicherbedarf)
2. Abschätzung der Qualität des generierten Layouts im Vergleich zu manuellen Layouts und 'klassischen' Verfahren, wie dem Lee-Algorithmus. Ein Vergleich mit kommerziell verwendeten Programmen muß sich auf die verfügbaren (spärlichen) Zahlenangaben stützen und ist daher nicht sehr aussagekräftig. Die 'Schwierigkeit' eines Entwurfs hängt neben den berechenbaren Größen wie Leiterdichte, Pindichte, Anzahl der Verbindungen usw. von der Struktur der Schaltung ab. Eine Kennzahl dafür ist die mittlere Anzahl der Bausteinanschlüsse, die zu einem Potential gehören. Diese Kennzahl beschreibt aber nur einen Teilaspekt. Es ist beispielsweise nicht ersichtlich, wie gut sich die Bausteine plazieren ließen, d.h. wie hoch der Anteil der zu verbindenden Bausteine ist, die direkt benachbart liegen. Die Beispiele in 6.2.3 zeigen, daß bei gleichem Rastertyp und gleichem Leiterplattenformat trotz einer um mehr als 20% höheren Wegeanzahl ein höherer Fertigstellungsgrad erzielt werden kann. Der Vollständigkeitsgrad der Leiterführung und die Anzahl der Durchkontaktierungen werden als Qualitätsmerkmal für das Konstruktionsergebnis gewertet.

Definition:

$$\text{Pindichte PD} = \frac{\text{Bausteinpins} + \text{Steckerpins}}{\text{LP-Fläche [cm}^2\text{]}}$$

6.1 Abschätzung von Rechenzeit- und Speicherbedarf =====

Der Speicherbedarf des Modellalgorithmus wird durch die Anzahl der Zellen im Entwurfsraster bestimmt. Da zu jeder Zelle die Signalzugehörigkeit gespeichert wird, beträgt er ein Ganzwort pro Zelle. Eine Einsparung gegenüber Lee wird dadurch erreicht, daß nicht jedem Rasterlinienschnittpunkt des Leiter-rasters eine Zelle entspricht.

Der Rechenzeitbedarf hängt von der Komplexität der verwendeten Regeln, vom Schwierigkeitsgrad des Entwurfs (gegeben durch die Pindichte auf der Leiterplatte und die Anzahl der zu konstruierenden Verbindungen, der Rasterwahl und der Anzahl der benötigten Konstruktionsläufe bis zur vollständigen Abarbeitung der Verbindungsliste) ab.

Ein Vergleich mit dem Lee-Algorithmus gibt eine grobe Abschätzung für die Einsparungen, die mit dem Modellalgorithmus zu erreichen sind.

Der Rechenzeitbedarf wird wesentlich durch den Suchprozeß, also den Aufbau des Baumes der virtuellen Leiter bestimmt und ist damit eine Funktion

- . von der Anzahl der Konstruktionsschritte, die zum Erreichen des Zielpunktes nötig sind -
- . von der Anzahl der Zellen, die in jedem Konstruktionsschritt untersucht werden müssen -
- . von der Anzahl der Abfragen, die für jede dieser Zellen zu machen sind: das sind mindestens die Abfragen, ob die Zelle
 - noch keinen Vorgänger hat
 - die Zelle Zielpunkt ist
 - die Zelle zulässiger Nachfolger des Vorgängers ist -
- . von der Komplexität der Rechenvorschrift für die zulässigen Nachfolger einer Zelle.

Sei

m	die Anzahl der Nachbarn einer Zelle
$m^*(k-1)$	die mittlere Anzahl der Zellen, die im k.-ten Konstruktionsschritt Nachfolger generieren dürfen: $k=2,3,\dots K$
K	die Anzahl der Konstruktionsschritte, die zur Realisierung einer Verbindung $S \rightarrow Z$ benötigt werden mit $x_s, y_s(x_z, y_z)$ Rasterkoordinaten von $S(Z)$.
$a \leq m^* m^*(k-1)$	Anzahl der Zellen, die im k.-ten Konstruktionsschritt zu untersuchen sind
$A \leq k^2 + (k+1)^2$	die Anzahl der insgesamt nach k Schritten im virtuellen Leiterbaum enthaltenen Zellen
m_T	die Anzahl der Nachfolger einer Zelle vom Typ T

Die Anzahlen a und A werden im Modellalgorithmus durch folgende Maßnahmen gesenkt:

1. Unterscheidung zwischen 'Nachbar' und 'Nachfolger': nur für den Startpunkt $x=S$ einer Verbindung mit $c=d(S)=0$ sind die $n-1$ -Nachbarn zu x auch Nachfolger zu x . Sei $\vec{L}_x$ der Verweisvektor von x und $\vec{L}_{x'}$, der der relativen Lage von x und x' entsprechende Verweisvektor von x' . Dann sind nur diejenigen $x' \in N(x)$ mögliche Nachfolger zu x , deren Verweisvektoren $\vec{L}_{x'}$, skalar multipliziert mit $\vec{L}_x$ nicht negativ sind.
Im Einheitsraster mit $m=4$ müssen daher anstatt vier Zellen nur jeweils drei Zellen auf Zulässigkeit als Nachfolger untersucht werden. Im D127-Raster reduzieren sich die Nachfolger, bei achsparallelen Übergängen, von acht auf fünf, bei diagonalen Übergängen von acht auf drei (bzw. zwei, wenn man eine Fortsetzung in der diagonalen Richtung verbietet).

2. Verdoppelung der Schrittweite

$$K \rightarrow K/2$$

Verbesserung:

$$\frac{A'}{A} \approx \frac{(K/2)^2 + (K/2+1)^2}{K^2 + (K+1)^2} = \frac{1}{4}$$

3. Arbeiten im Konstruktionsfenster

$$K = |x_s - x_z| + |y_s - y_z|$$

Verbesserung:

$$\frac{A'}{A} \approx \frac{|x_s - x_z| * |y_s - y_z|}{K * (K+1)}$$

4. Beschränkung der Nachfolger auf Zellen, die die Entfernung zum Zielpunkt verkürzen.

$$m \rightarrow m_z, m_z < m$$

Verbesserung:

$$\frac{a'}{a} \approx \frac{m_z^2 * (k-1)}{m^2 * (k-1)} = \frac{m_z^2}{m^2}$$

5. Einführung des Zelltyps

Sei Z die Anzahl der Zellen insgesamt, ZA die Anzahl der Zellen vom Typ A und ZB die Anzahl der Zellen vom Typ B, dann gilt mit

m_A der Anzahl der Nachfolger einer Zelle vom Typ A,

m_B der Anzahl der Nachfolger einer Zelle vom Typ B und

$$Z = Z_A + Z_B \text{ und } m_B < m_A < m$$

Verbesserung:

$$\frac{a'}{a} \approx \frac{m(k-1) * (Z_A * m_A + Z_B * m_B) / Z}{m^2 * (k-1) Z} = \frac{Z_A * m_A + Z_B * m_B}{m * Z} ;$$

Dies ist nur eine Abschätzung, da die Zahlen für A und a nur auf der 'leeren' Leiterplatte gelten, wo sich der virtuelle Leiterbaum meistens auffächert. Im Mittel ist etwa die Hälfte der Zellen bereits mit Leiterelementen, Durchkontaktierungen oder anderen Hindernissen belegt, so daß die Anzahlen a und A entsprechend niedriger sind.

6.2 Konstruktionsergebnis

=====

Layouts, die manuell erstellt werden, liegen bezüglich der Durchkontaktierungen im Mittel um 20% unter den Werten, die mit dem Modellalgorithmus erzielt werden. Gegenüber dem Lee-Algorithmus werden jedoch Durchkontaktierungen eingespart, da durch die schlechtere Bewertung der nicht geradlinigen Fortsetzungen, die Durchkontaktierungen verursachen, diese nur dann generiert werden, wenn unter den vorgegebenen Randbedingungen keine andere Lösung möglich ist und auch die 2-Nachbarn die Bewertung von Übergängen beeinflussen.

Die mittleren Leitungslängen unterscheiden sich nur unwesentlich von den beim manuellen Entwurf erreichbaren: es werden mehr als 75% der Leitungen umweglos unter Berücksichtigung des günstigsten Anschlusses an ein schon vorhandenes Teilnetz des gleichen Potentials konstruiert (s. Bild 38).

Der Vollständigkeitsgrad liegt beim manuellen Entwurf um etwa 3 % bis 5 % besser als beim automatischen Entwurf mit dem Modellalgorithmus. Die in 6.2.3 beschriebenen ersten beiden Beispiele konnten auch im Handentwurf im D127-Raster nicht vollständig entflochten werden. Der Fertigstellungsgrad lag dabei um 98%.

6.2.1 Der Einfluß der Rasterwahl =====

Es wurden drei Raster implementiert:

1. Das D127-Raster
 - 1.1 mit Zelltyp A
 - 1.2 mit Zelltyp A und Zelltyp B.
2. Das D635-Raster
 - 2.1 mit Zelltyp A
 - 2.2 mit Zelltyp A und B.
3. Das DU-Raster

Für alle Raster gilt: eine Zelle vom Typ A kann ein Leiterelement in jeder Ebene oder eine Durchkontaktierung aufnehmen; eine Zelle vom Typ B entsprechend dem Rastertyp ein bis zwei Leiterelemente in jeder Ebene und i.a. keine Durchkontaktierung.

Der Typ einer Zelle ist innerhalb eines Konstruktionsdurchlaufes nicht änderbar. Es zeigt sich, daß durch die Beschränkung der Anzahl der Zellen vom Typ A und einer spalten- bzw. reihenweisen Anordnung dieser Zellen der Verlauf der Leiterbahnen in den entstehenden 'Gassen' stärker geordnet erscheint und eine höhere Leiterdichte erreicht wird.

Beobachtungen:

1. Wird im D635-Raster mit gleichen Abmessungen für Leiterelemente und Durchkontaktierungen wie im D127-Raster gearbeitet, so wird bei etwa vervierfachter Rechenzeit die zu erreichende Leiterdichte kaum erhöht, da die Wirkungsbereiche der Durchkontaktierungen die Nutzung der angrenzenden Rasterlinien erschweren.

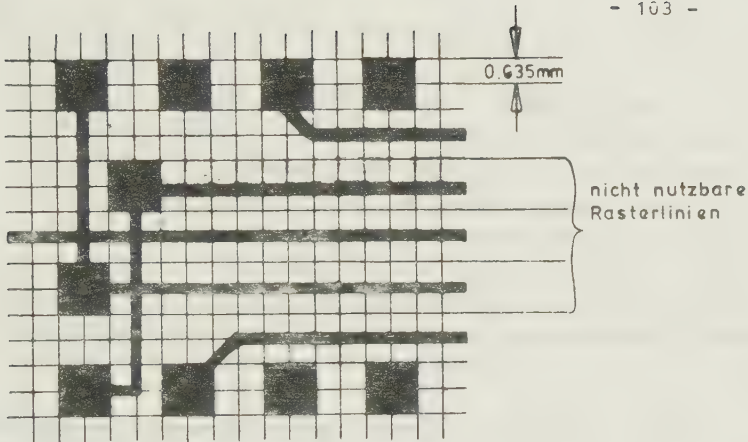


Bild 37: Detail aus einem Leiterplattenentwurf im D635-Raster

Die in Bild 37 eingezeichneten Wirkungsbereiche blockieren die angrenzenden Rasterlinien, so daß in diesem Bereich gegenüber dem D127-Raster keine höhere Leiterdichte erzielt werden kann.

2. Im D635-Raster ist es günstig, mit mehr als zwei Konstruktionsläufen zu arbeiten, da auf einer noch schwach mit Verbindungen belegten Leiterplatte durch die hohe Anzahl der zu untersuchenden Alternativen bei der Konstruktion der virtuellen Wege die Rechenzeiten zu stark ansteigen. Ein Beispiel soll das veranschaulichen:

Fall 1: 2 Durchläufe

1. Durchlauf: Es gelten die Restriktionen:

Konstruktionsfenster,
eingeschränkte Richtungen,
75 % der Zellen haben Zelltyp B, d.h.
die Gitterweite des D-Rasters beträgt 2.54 mm.

2. Durchlauf: keine Restriktionen

Fall 2: 3 Durchläufe

1. Durchlauf: wie bei Fall 1
2. Durchlauf: 50 % der Zellen haben Zelltyp B,
Restriktionen wie beim 1. Durchlauf
3. Durchlauf: keine Restriktionen

Im Fall 1 betrug die mittlere Rechenzeit pro Weg für die ersten 20 Verbindungen im 2. Durchlauf 14.3 sec, im 2. Fall nur 2.6 sec.

3. Das DU-Raster ermöglicht bei etwas erhöhten Anforderungen an Leiterbreiten und Mindestabstände ($l = \min = 0.25$ statt 0.3 mm) eine gegenüber dem D127-Raster um etwa 30 % erhöhte Leiterdichte. Die Rechenzeit steigt dabei nur unwesentlich an, da die Anzahl der Zellen im Entwurfsraster gleich bleibt. Es erscheint nicht günstig, die Nachbarschaftsfunktion so festzulegen, daß bei Übergängen zum Nachfolger auch bei nicht achsparallelen Richtungen Rasterlinien des Entwurfsrasters gekreuzt werden. Es entstehen dadurch wie beim D635-Raster schlecht nutzbare Rasterlinienabschnitte. Es wären zwei Varianten des Rasters denkbar:

Variante 1:

Die Definition der Nachfolger in achsparallelen Richtungen wird unverändert übernommen.

In den nichtachsparallelen Richtungen wird eine Zusatzbedingung eingeführt, die besagt, daß der Manhattanabstand m zwischen Vorgänger x und Nachfolger x' kleiner 4 bleibt. Die Übergänge mit $d(x') = 12, 15, 17$ oder 22 werden also ersetzt durch Übergänge innerhalb einer Zelle. Der Übergang von einer Vorgängerezelle zur Nachfolgerzelle wird damit ersetzt durch einen Wechsel zur diametral entgegengesetzten Position innerhalb der Zelle.

Definition:

Manhattanabstand zwischen zwei Punkten $P_1(x_1, y_1)$ und $P_2(x_2, y_2)$:

$$m = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1|$$

Beispiel: (vgl. Bild 34):

$P(x) = (4, 2), d(x') = 12, dx = 2, dy = -2$

→ Zellabstand $dz = 0$

Rasterabstand $dx = 1, dy = -1$

Variante 2:

Die Definition der Nachfolger in achsparallelen Richtungen wird unverändert übernommen. Alle Übergänge in den nicht achsparallelen Richtungen mit einem Manhattanabstand $m = 3$ zwischen Vorgänger und Nachfolger werden ersetzt durch einen achsparallelen Übergang innerhalb der Zelle senkrecht zur Vorzugsrichtung der Ebene. Der Übergang in Richtung der Rasterdiagonalen mit $m = 4$ wird wie bei Variante 1 ersetzt.

Beispiel:

$P(x) = (4, 2)$

$d(x')$	dx	dy	dz
9	1	0	0
11	0	-1	0
12	1	-1	0

4. Etwa 80% der Verbindungen werden umweglos konstruiert und haben höchstens eine Durchkontaktierung. Bild 38 zeigt die Statistik der relativen Leiterlängen l , die folgendermaßen definiert sind:

$$l = \frac{l_r}{l_t} = \frac{\text{Länge der konstruierten Verbindung}}{|xz - xs| + |yz - ys|}$$

und die Statistik der Durchkontaktierungen pro Weg für den Entwurf E1 der Schaltung 1 aus 6.2.3.

Da nach der Entflechtung der Schaltung der gesamte Entwurf inspiziert wird, ob durch Ändern der Ebenenzugehörigkeit eines Leitersegmentes Ebenenwechsel vermieden werden können, stellt dieser Wert eine obere Schranke für die Anzahl der Durchkontaktierungen pro Weg dar.

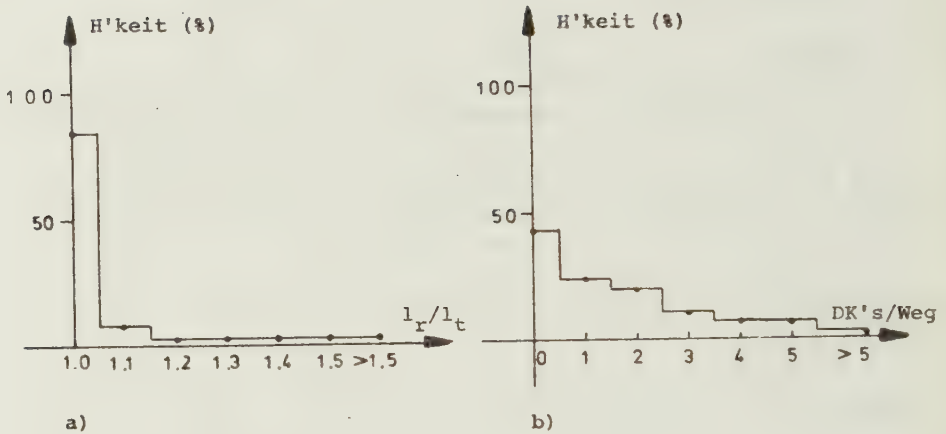


Bild 38: Statistik der relativen Leitungen (a) und der Anzahl der Durchkontaktierungen/Weg (b)

6.2.2 Der Einfluß der Konstruktionstaktik =====

Der Einfluß von vier Konstruktionsregeln in unterschiedlichen Kombinationen wurde an einem Beispiel mit 20 integrierten Bausteinen und 161 Verbindungen untersucht.

Verwendete Abkürzungen:

- S - Startpunkt einer Verbindung mit den Koordinaten (xs,ys)
- Z - Zielpunkt einer Verbindung mit den Koordinaten (xz,yz)

Konstruktionsregeln:

A: Arbeiten im Konstruktionsfenster (d.h. einem S und Z umbeschriebenen Rechteck) -

B: Arbeiten mit zwei oder drei Bewertungsstufen B bei der Fortsetzung von virtuellen Wegen -

bei B=2 wird nur unterschieden zwischen:

- . Übergang mit Richtungswechsel
- . Übergang ohne Richtungswechsel

Bei B=3 wird unterschieden zwischen:

- . Fortsetzung eines Weges ohne Richtungswechsel
- . Fortsetzung eines Weges mit Richtungswechsel, ohne Ebenenwechsel
- . Fortsetzung eines Weges mit Richtungs- und Ebenenwechsel

C: Richtungsabhängige Konstruktionen: Sei $\vec{L}$ der Ortsvektor von Z in einem kartesischen Koordinatensystem mit Ursprung in S. Dann sind als Nachfolger zu einer Zelle x nur diejenigen $x' \in N(x)$ zulässig, bei denen das Skalarprodukt $\vec{L} \cdot \vec{L}_{x'}$ positiv ist (vgl. 4.1.2.3), bzw. ≥ 0 .

D: Unterscheidung von Zellen unterschiedlichen Typs:

- . Zelltyp A darf Durchkontaktierungen oder Leiterelemente enthalten
- . Zelltyp B darf nur Leiterelemente erhalten

Es wurden insgesamt 10 Testläufe mit unterschiedlichen Sätzen von Regeln in jeweils zwei Durchläufen durchgeführt, um die günstigsten Regelkombinationen zu ermitteln.

Test- Nr.	1. Durchlauf				2. Durchlauf				Bewertung K
	A	B	C	D	A	B	C	D	
1	+	2	+	-	-	2	-	-	0.65
2	+	2	-	-	-	2	-	-	1.62
3	+	3	+	-	-	3	-	-	-0.01
4	+	3	-	-	-	3	-	-	3.65
5	+	2	+	+	-	2	-	+	5.55
6	+	2	-	+	-	2	-	+	3.67
7	+	3	+	+	-	3	-	+	3.53
8	+	3	-	+	-	2	-	+	4.63
9	+	2	+	+	-	2	-	-	0.02
10	+	3	+	+	-	3	-	-	0.00

Bild 39: Leiterführung unter unterschiedlichen Restriktionen mit Bewertung K. Der kleinste K-Wert stellt das beste Konstruktionsergebnis dar.

Die Bewertungskriterien orientieren sich an den Kosten für den Entwurf, die zu minimieren sind (ein Vollständigkeitsgrad unter 100 % macht manuelle Nachbearbeitung nötig) und den Kosten für die Fertigung und Prüfung der Leiterplatte, die von der Anzahl der Durchkontaktierungen mitbestimmt sind.

1. Vollständigkeitsgrad V

$$V = \frac{\text{nicht gef. Wege}}{\text{Wege insgesamt}} \cdot 100 [\%]$$

2. Rechenzeit RZ

3. Anzahl der Durchkontaktierungen ANZ

Für die Bewertung K eines Konstruktionsergebnisses wird folgender Ansatz vorgeschlagen:

$$K = a \cdot (100 - v) + b \cdot \left(\frac{RZ - \overline{RZ}}{\overline{RZ}} \right) + c \cdot \left(\frac{ANZ - \overline{ANZ}}{\overline{ANZ}} \right)$$

wobei $\overline{RZ}$ die mittlere Rechenzeit für den Entwurf ist und $\overline{ANZ}$ die mittlere Anzahl von Durchkontaktierungen.

Wählt man als Wert der Gewichtungsfaktoren $a=3$, $b=2$ und $c=1$, ergeben sich für die zehn Testläufe die Bewertungen wie sie in Bild 39 angegeben sind. Die Bewertung nach obiger Formel stellt eine Relation zwischen der Güte verschiedener Entwürfe zu einer Schaltung her. In Bild 40 sind die in den zehn Testläufen erzielten Ergebnisse grafisch aufgetragen.

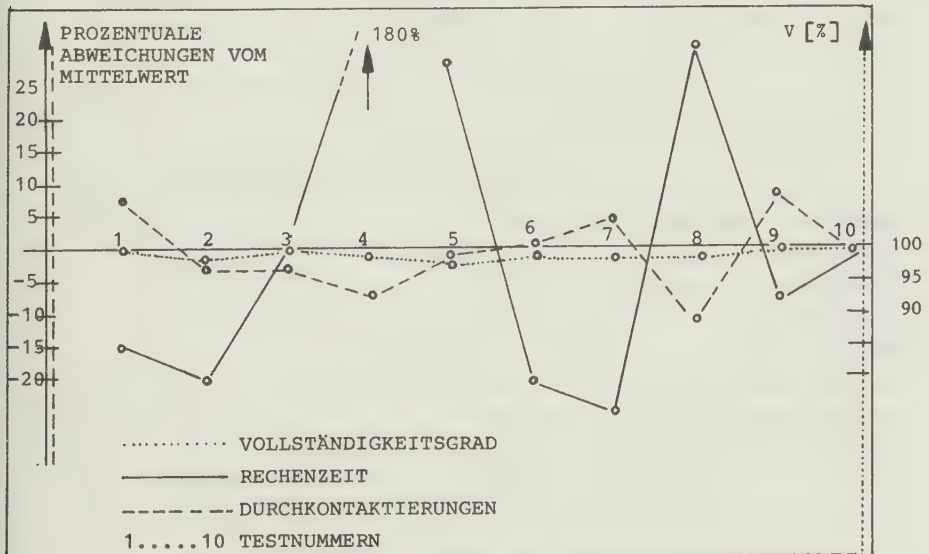


Bild 40: Der Einfluß der Konstruktionstaktik auf das Entwurfsergebnis

6.2.3 Beispiele =====

Anhand von sechs Entwürfen zu drei Schaltungen mit hoher Leiterdichte soll der Einfluß der Konstruktionstaktik und der Rasterwahl auf das Konstruktionsergebnis demonstriert werden.

Schaltung_1

Bezeichnung	:	Floppy Disk PIA Platine 1.08
Anzahl der Verbindungen:		261
Anzahl der Signale	:	118 + VCC + GND
Mittl. Pinzahl/Signal	:	2.8
Platzbedarf	:	24 PE (1 PE ist der Platzbedarf eines 14-poligen IC)
Pindichte PD	:	2.6
Steckerleiste rechts	:	2-reihig, 64-polig, 50 davon belegt
Steckerleiste links	:	4 Testpunkte
Besondere Schwierigkeit:		dicht belegte Steckerleiste

Schaltung_2

Bezeichnung	:	Floppy Disk Speicherplatine 1.11
Anzahl der Verbindungen:		308
Anzahl der Signale	:	76 + VCC + GND
Mittl. Pinzahl/Signal	:	4.5
Platzbedarf	:	28 PE
Pindichte	:	2.7
Steckerleiste rechts	:	2-reihig, 64-polig, 38 davon belegt
Steckerleiste links	:	keine
Besondere Schwierigkeit:		sehr hohe Anzahl von Wegen, am linken rand waren 5 PE's freizuhalten

Schaltung_3

Bezeichnung	: Register Platine 4.03
Anzahl der Verbindungen	: 187
Anzahl der Signale	: 108 + VCC + GND
Mittl. Pinzahl/Signal	: 2.7
Platzbedarf	: 9*14-polig, 5*16-polig
Pindichte PD	: 1.98
Steckerleiste rechts	: 2-reihig, 64-polig, 57 davon belegt
Steckerleiste links	: keine
Besondere Schwierigkeit	: keine

Die dichte Belegung der rechten Steckerleiste mit 57 Signalen konnte durch geeignete Platzierung und Definition größerer Platzeinheiten (1 PE $\hat{=}$ 16*22 Rastereinheiten) kompensiert werden.

In allen drei Schaltungen sind die Hauptstränge der Versorgungsleitungen manuell vorgegeben. Der Anschluß der VCC und GND-Pins der Bausteine an diese Versorgungsleitungen wird vom Programm vor der Abarbeitung der Verbindungsliste konstruiert.

Bild 41 zeigt das durch Vollständigkeitsgrad V, die Anzahl der Durchkontaktierungen ANZ und die mittlere Rechenzeit pro Verbindung RZ charakterisierte Konstruktionsergebnis für die drei Entwürfe E1, E2 und E3 der Schaltung 1, die Entwürfe E4 und E5 für Schaltung 2 und E6 für Schaltung 3. Die Spalte KT in Bild 41 charakterisiert die Konstruktionstaktik.

Zu_(1)

Rastertyp D127, Konstruktion in zwei Durchläufen

1._Durchlauf

Zwei Bewertungsstufen, Konstruktionsfenster, alle Zellen haben Typ A, eingeschränkte Richtungen

2._Durchlauf

Zwei Bewertungsstufen, keine Restriktionen

Zu_(2)

Rastertyp D127, Konstruktion in zwei Durchläufen

1._Durchlauf

Zwei Bewertungsstufen, Konstruktionsfenster, 50 % der Zellen haben Typ B, eingeschränkte Richtungen

2._Durchlauf

Drei Bewertungsstufen, keine Restriktionen

Zu_(3)

Rastertyp: modifiziertes D635-Raster, Konstruktion in drei Durchläufen. Vernachlässigung des Wirkungsbereiches von Durchkontaktierungen.

Die Lage der Durchkontaktierungen der im dritten Konstruktionslauf konstruierten Verbindungen muß überprüft werden, da mit Verletzung des Mindestabstands gerechnet werden muß. Dieses 'Fehlverhalten' des Algorithmus wird bewußt in Kauf genommen, um eine möglichst vollständige Leiterführung zu erzielen, die dann manuell überarbeitet werden kann.

1. Durchlauf

Zwei Bewertungsstufen, Konstruktionsfenster, 25 % der Zellen haben Zelltyp A, eingeschränkte Richtungen

2. Durchlauf

Drei Bewertungsstufen, Konstruktionsfenster, Zelltyp wie beim ersten Durchlauf, eingeschränkte Richtungen

3. Durchlauf

Drei Bewertungsstufen, keine Restriktionen

Entwurf	KT	1. Durchl.		2. Durchl.		3. Durchl.		Ergebnis		
		NG	t	NG	t	NG	t	V	ANZ	K
E1	(1)	13.0	2.5	6.5	16.6	---	---	93.5	289	20.2
E2	(2)	19.2	2.0	5.0	14.9	---	---	95.0	289	14.4
E3	(3)	34.9	6.7	26.4	8.8	1.5	59.9	98.5	312	5.9
E4	(1)	16.2	2.2	5.8	5.5	---	---	94.5	286	16.9
E5	(2)	19.4	2.0	4.5	4.9	---	---	95.5	287	14.4
E6	(2)	17.1	1.9	0.5	19.4	---	---	99.5	181	---

Bild 41: Konstruktionsergebnis von sechs Testläufen

mit NG Nicht konstruierte Verbindungen in %

t mittlere Rechenzeit pro Verbindung in Sekunden

K Bewertungskennzahl

(Die Bewertungskennzahl dient nur zum Vergleich unterschiedlicher Entwürfe zu einer Schaltung)

(Definition vgl. 6.2.2)

KT Kennzahl für die verwendete Konstruktionstaktik

Im Anhang ist unter 7.3 gezeigt, wie ein Leiterplattenentwurf entsteht. Als Beispiel ist der Entwurf der Schaltung 1.08 in zwei Konstruktionsläufen gewählt.

Zuerst werden alle kurzen Verbindungen konstruiert. Auf der fast "leeren" Leiterplatte können nahezu alle Verbindungen umweglos geführt werden. Nach der Überarbeitung (vgl. 5.3) enthält der Entwurf kaum Durchkontaktierungen, obwohl bei der Konstruktion der Verbindungen die Vorzugsrichtungen streng eingehalten werden. Das 1. Bild (A13) zeigt die Leiterebenen nach dem Anschluß der VCC-Pins und GND-Pins der Gehäuse an die (manuell vorgegebenen) Hauptstränge der Versorgungsleitungen und die ersten 50 konstruierten Verbindungen. Im 2. Bild (A14) sind 100 Verbindungen konstruiert, im 3. Bild 150 (A15) und im 4. Bild (A16) alle, bis auf die, die unter den gegebenen Bedingungen unkonstruierbar waren.

Die Tabelle zeigt deutlich den Anstieg der mittleren Leitungslänge $\bar{l}$, der Anzahl der Durchkontaktierungen pro Weg $\bar{D}$ und der mittleren Rechenzeiten pro Weg $\bar{t}_1$ und $\bar{t}_2$ mit steigendem Abarbeitungsgrad der Verbindungsliste.

Mit $T = g_1 \cdot \bar{t}_1 + g_2 \cdot \bar{t}_2$, der Gesamtrechenzeit in Sekunden, und der Gesamtleitungslänge GSL in Rastereinheiten ($\approx 1.27 \text{ mm}$) kann man das Verhältnis v bilden, das eine Aussage über die Geschwindigkeit liefert, mit der jeweils konstruiert wurde:

$$v = \frac{GSL}{T} \left[\frac{RE}{sec} \right]$$

Wege	Entwurf	1. Durchlauf		2. Durchlauf		DK	GSL	$\bar{D}$	$\bar{l}$	v
		$\bar{t}_1$	g_1	$\bar{t}_2$	g_2					
50+42	A9	0.2	92	-	0	7	656	0.08	7.13	35.7
100+42	A10	0.7	139	5.0	3	35	2010	0.25	14.15	17.9
150+42	A11	1.1	174	9.3	16	103	3594	0.54	18.91	10.6
217+42	A12	2.0	205	15.2	41	294	7912	1.20	32.16	7.7

g_1 Zahl der im 1.-ten Durchlauf konstruierten Wege

6.2.4 Interpretation der erzielten Ergebnisse

=====

1. Ausgehend von der Pindichte PD (Anzahl der Bausteinpins + Anzahl der Steckerpins bezogen auf die Leiterplattenfläche) läßt sich abschätzen, ob ein Entwurf im vorgegebenen Raster und der vorgegebenen Anzahl der Leiterebenen realisierbar ist. Für das D127-Raster mit zwei Ebenen muß $PD < 2.5$ [Pins/cm²] sein.
2. Die Rechenzeit für den Entwurf steigt mit der Verkleinerung der Rasterweite und der Anzahl der zu untersuchenden Alternativen stärker als linear an. Es empfiehlt sich, den gesamten Entwurf in mehreren Durchläufen mit schrittweise reduzierten Restriktionen durchzuführen.
3. Die 'Programmierbarkeit' des Konstruktionsalgorithmus und die freie Rasterwahl erlauben eine flexible Anpassung an den Schwierigkeitsgrad der Schaltung.

6.3 Schlußbemerkungen

=====

Die Nachbildung menschlicher Intelligenz, die sich bei der Lösung von Entwurfsproblemen als 'analytisches Denkvermögen', 'assoziatives Denkvermögen' und 'Kreativität' äußert, ist bei den heute verfügbaren Rechenanlagen und den üblichen Programmieretechniken nur eingeschränkt realisierbar.

So ersetzt das 'computer-aided-design', weitgehend das ehrgeizige Ziel der 'design-automation', wie sie bis 1976 noch auf zahlreichen Gebieten des logischen und des konstruktiven Schaltungsentwurfs angestrebt wurde [14].

Beim rechnerunterstützten interaktiven Entwurf ist der Rechner für Arbeitsvorbereitung, Informationsdienste und Qualitätskontrolle zuständig. Der Mensch allein trifft Entscheidungen, die jedoch durch den Dialog mit dem Rechner wesentlich beschleunigt und von eventuellen Fehlern bereinigt werden.

Ergebnisse, die mit dieser Vorgehensweise erreicht werden, sind notwendig von der Qualifikation des menschlichen Bearbeiters weitgehend abhängig. Daher ist die Entwicklung automatisch arbeitender Programme für bestimmte konstruktive Bereiche und definierbare Problemklassen weiterhin wünschenswert.

Liefert ein Programm für den Entwurf von Verbindungswegen keine vollständige Lösung, so ist durch eine anschließende interaktive Bearbeitung i.a. eine vollständige Entflechtung zu erzielen. Alle kommerziell vertriebenen Systeme wie das REDAC und BELL enthalten daher Programm-Moduln für die Überarbeitung des automatischen Layout durch einen Konstrukteur [2,4,14].

Die interaktive Phase im Entwurfsprozeß kann durch eine gute Ausgangslösung wesentlich verkürzt werden. Bei einer automatisch gefundenen Ausgangslösung ist es wesentlich, daß sie unter den selben Randbedingungen konstruiert wird, die für die spätere manuelle Weiterbearbeitung gelten. Es ist beispielsweise nahezu unmöglich, eine Leiterführung manuell in einem feineren Raster als dem beim automatischen Entwurf verwendeten zu vervollständigen.

Wesentlich für die Bewertung eines automatischen Programms ist also dessen Fähigkeit, manuelle Restriktionen und Randbedingungen zu berücksichtigen. In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, wie durch ein geeignetes Modell für die rastergebundene Konstruktion optimaler Leiterführungen benutzerdefinierte geometrische Bedingungen und Restriktionen verarbeitet werden.

Für nicht zu dicht belegte Leiterplatten (maximal 27 14-polige Bausteine auf einem Format 100*160 mm² entsprechend einer Pindichte < 2.5) läßt sich mit dem Modellalgorithmus eine vollständige Abarbeitung der Verbindungsliste erzielen. Bei dichter belegten Leiterplatten (2.5 < PD < 2.8) liegt die Vollständigkeit bei Entwürfen im D127-Raster noch bei mehr als 92 %. Untersuchungen mit dem DU-Raster werden voraussichtlich den Vollständigkeitsgrad auch bei diesen LP's deutlich erhöhen.

Die vollständige Leiterführung kann bei Zuhilfenahme eines weiteren Ebenenpaares oder durch Übergang auf ein feineres Raster erzielt werden.

Das Ergebnis, das der Konstruktionsalgorithmus liefert, eignet sich für die interaktive Weiterbearbeitung der Schaltung. Der Modellalgorithmus enthält bereits die Unterprogramme Setzen und Löschen von Leiterelementen, Setzen und Löschen von Durchkontaktierungen.

Die Vollständigkeitsraten, die mit diesem flexiblen Algorithmus erreicht werden, liegen bei vergleichbarer Packungsdichte um etwa 10 % - 20 % über denen, die bei kommerziell vertriebenen Systemen wie REDAC [4], CALMA [12] und BELL NORTHERN [2] für die automatische Entwurfsphase angegeben werden. Wichtiger ist jedoch die Freizügigkeit der Rasterwahl und die Einflußnahme des Benutzers auf Konstruktionstaktik.

Der Algorithmus ist nicht lernfähig.

Die Lernfähigkeit des Benutzers und die Fähigkeit des Algorithmus, benutzerdefinierte Regelkombinationen zur Definition der Konstruktionstaktik zu verarbeiten, lassen jedoch eine Verbesserung der erzielten Konstruktionsergebnisse mit steigender Erfahrung des Benutzers zu.

Durch die Möglichkeit, die Verbindungsliste in mehreren Durchläufen unter unterschiedlichen Randbedingungen zu entwerfen, wird der allen in der Literatur bekannten Programmen anhaftende Nachteil des "sequentiellen Abarbeitens" einer Verbindungsliste teilweise kompensiert.

Es wäre zu untersuchen, welche Verbesserungen sich durch das parallele Konstruieren mehrerer ausgesuchter Verbindungen erzielen lassen. Auswahlkriterium könnte beispielsweise die Signalzugehörigkeit sein oder die benachbarte Lage der jeweiligen Start- und Zielpunkte. Der Modellalgorithmus erlaubt bereits die Verarbeitung einer Startpunktmenge und einer Zielpunktmenge. Bei der parallelen Bearbeitung aller zu einem Potential gehörenden Verbindungen bestünde die notwendige Erweiterung in einer "Färbung" der von den unterschiedlichen durchschnittsfreien Startpunkt mengen ausgehenden virtuellen Leiterbäume, die es ermöglicht zu erkennen, wann eine Zelle von zwei unterschiedlichen Startpunkt mengen erreicht wird, denn dann ist eine der gesuchten Verbindungen konstruiert.

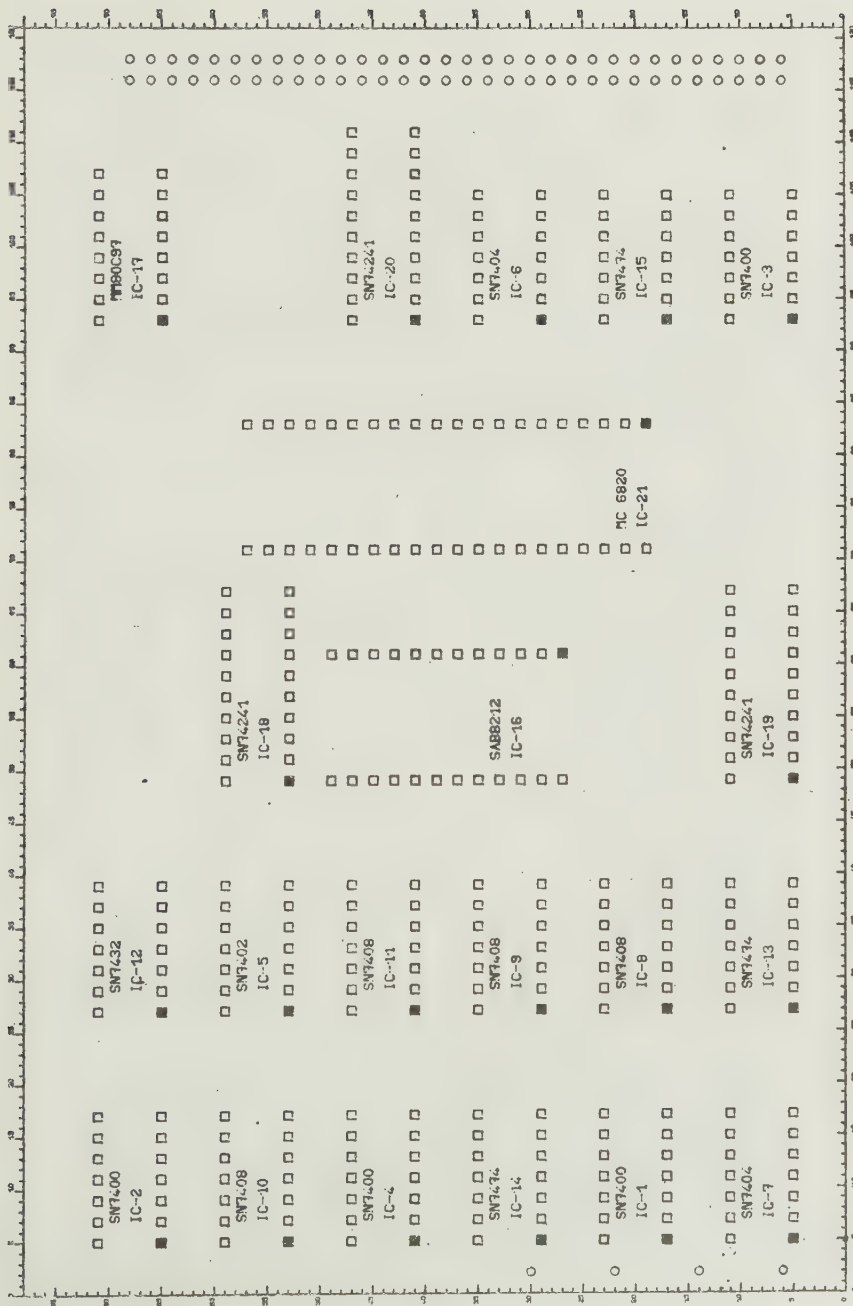
Auch wenn man am sequentiellen Abarbeiten der Verbindungsliste in den Konstruktionsläufen festhält, könnten sicherlich noch Verbesserungen erreicht werden, wenn als Kriterium für die Reihenfolge nicht nur die voraussichtliche Länge der Verbindung angezogen wird. Für die Zuordnung von Verbindungen zu Ebenenpaaren bei Multilayerleiterplatten ist das jetzige Vorgehen, wo in einem Ebenenpaar nicht konstruierbare Verbindungen im nächsten Ebenenpaar konstruiert werden, wegen der ungleichmäßigen Auslastung der Ebenenpaare ebenfalls unbefriedigend. Die Grenzen der Automatisierbarkeit des konstruktiven Schaltungsentwurfes könnten damit weiter verschoben werden. Aufgehoben werden sie dadurch nicht.

Wenn sich auch ingenieurmäßiges Vorgehen bei der Entwicklung von Software durchgesetzt hat, so ist doch die heutige Generation der Softwareprodukte auf dem Gebiet des konstruktiven Schaltungsentwurfs noch nicht in der Lage, selbst mit ingenieurgemäßer Methodik und ingenieurgemäßer Intuition vorzugehen.

7. SCHRIFTTUM

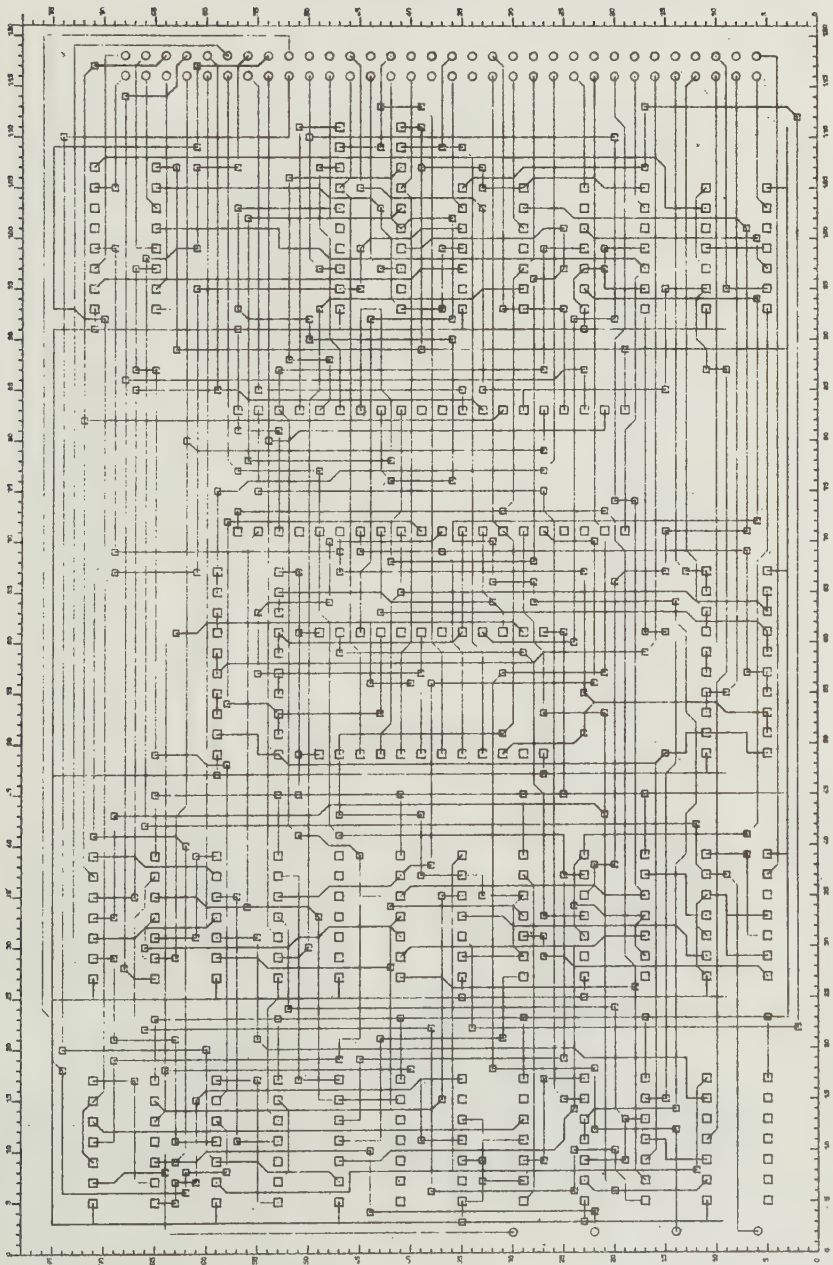
- [1] Akers: A Modification of Lee's Path Connection Algorithm
IEEE Trans. on Electr. Comp., Vol. EC-16, 1967, S. 97-98
- [2] Bell: Northern Research, Circuit Pack System, Fa. CADE,
Laichingen, Hindenburgstr. 19, April 1978
- [3] Breuer: Recent Developments in Design Automation, Computer,
Mai 1972, S. 23-35
- [4] Fa. CADE: REDAC System, 7903 Laichingen
- [5] Gilbert, E.N., Pollak, H.O.: Steiner Minimal Trees, SIAM
J. of Applied Math. 16, 1968, S. 1-29
- [6] Grotz: Plazieren und Pseudoleitungsfinden bei Schaltkreisen,
Dissertation, Naturwiss. Fakultät der TH Braunschweig 1973
- [7] Hanan: On Steiner's Problem with Rectangular Distances
SIAM J. of Appl. Math. Vol. 14, 1966, S. 255-256
- [8] Hesking: Automatic Printed Circuit Board Routing with Inter-
mediate Control of the Tracking: Apricot, Computer Aided
Design, Vol. 8, Nr. 3, Juli 1976
- [9] Hightower, D.W.: A Solution to line Routing Problems on
the Rectangular Plane, Proc Share Design Automation Work-
shop 6, 1969, S. 1-24
- [10] Hightower, D.W.: The Interconnection Problem, Proc. IEEE,
10.th Design Automation Workshop, 1973, S. 1-21
- [11] Hitchcock: Cellular Wiring and the Cellular Moduling
Technique, Design Automation Workshop 6, 1969, Miami Beach
- [12] Hoffmann: Automatic Gate Allocation Placement and Routing,
Symp. on CAD, Nov. 1978, Brüssel
- [13] Hoel: Some Variations of Lee's Algorithm, IEEE Trans. on
Comp. Vol. C-25, Nr. 1, Jan. 1976
- [14] Klomp: Custom LSI Design Economics, Symposium on Computer
Aided Design of Digital Electronic Circuits and Systems,
Nov. 1978, Brüssel
- [15] Knuth: The art of Computer Programming, Vol. I, Reading, 1972

- [16] Krupstedt: Ein interaktives Entwurfssystem zur Leitungswegbestimmung bei Mehrlagenschaltkarten, Dissertation, TU Braunschweig 1975
- [17] Kugel: Ein rechnergestütztes Entwurfssystem für Leiterplatten mit hoher Packungsdichte, Dissertation, Naturwiss. Fakultät der TH Braunschweig, 1976
- [18] Lars: Automated Printed Circuit Routing with a Stepping Aperture, Comm. ACM Vol. 12, Nr. 5, Mai 1969
- [19] Lee: An Algorithm for Path Connections and its Applications, IRE Trans. on Electr. Computers, Vol. EC 10, Nr. 3, Sept. 1961, S. 346-365
- [20] Mikami, K., Tabucchi, K.: A Computer Program for Optimal Routing of Printed Circuit Conductors, IFIPS Proc., Vol. H47, 1968
- [21] Rubin: The Lee Path Connection Algorithm IEEE Trans. Comp., Vol. C-23, Sept. 1964, S. 907-914
- [22] Rubin: Correction to the Lee Path Algorithm, IEEE Trans. Comp., Feb. 1976
- [23] Weber: Zum Entwurf von gedruckten Schaltungen mit Standardbausteinen, NTG-Tagung September 1975, Stuttgart
- [24] Weber: Einsatzmöglichkeiten des Computers bei der Herstellung gedruckter Schaltungen, Elektronik Produktion 1, 1976
- [25] Weber: Erfahrungen beim Einsatz eines Programmsystemes für den Entwurf von Leiterplatten, Seminar "Entwurf und Layout von gedruckten Schaltungen", München 1972

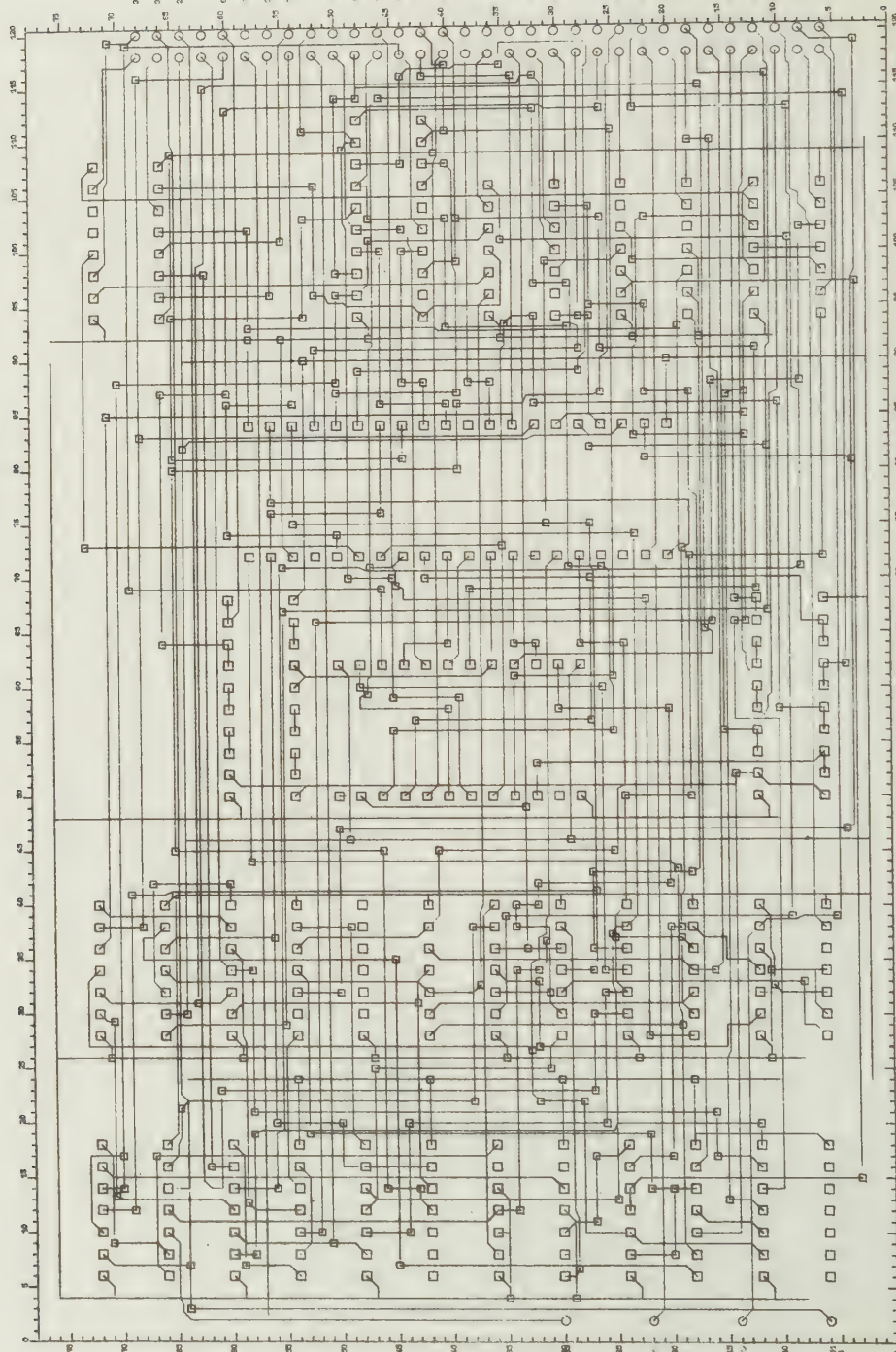


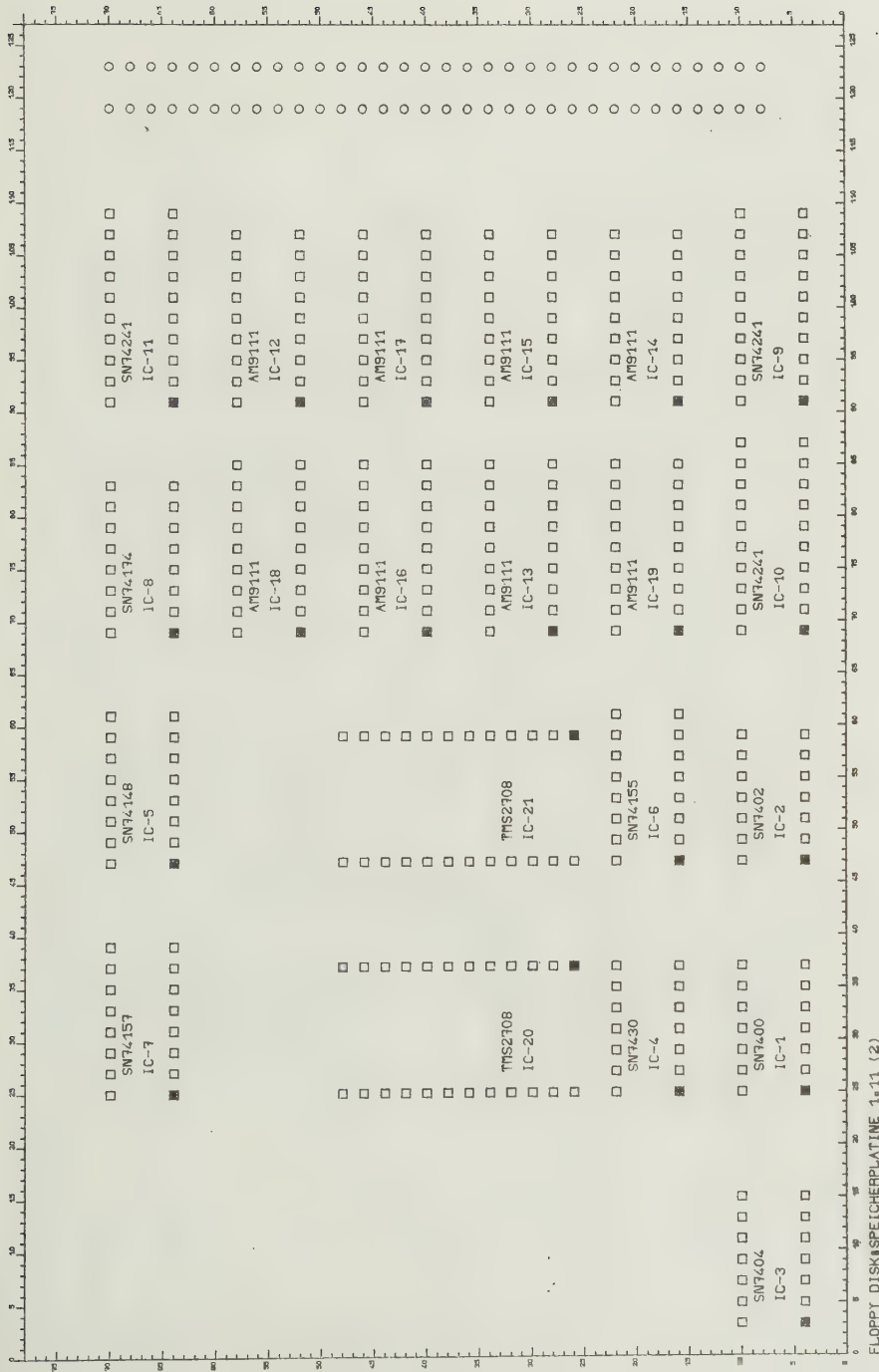


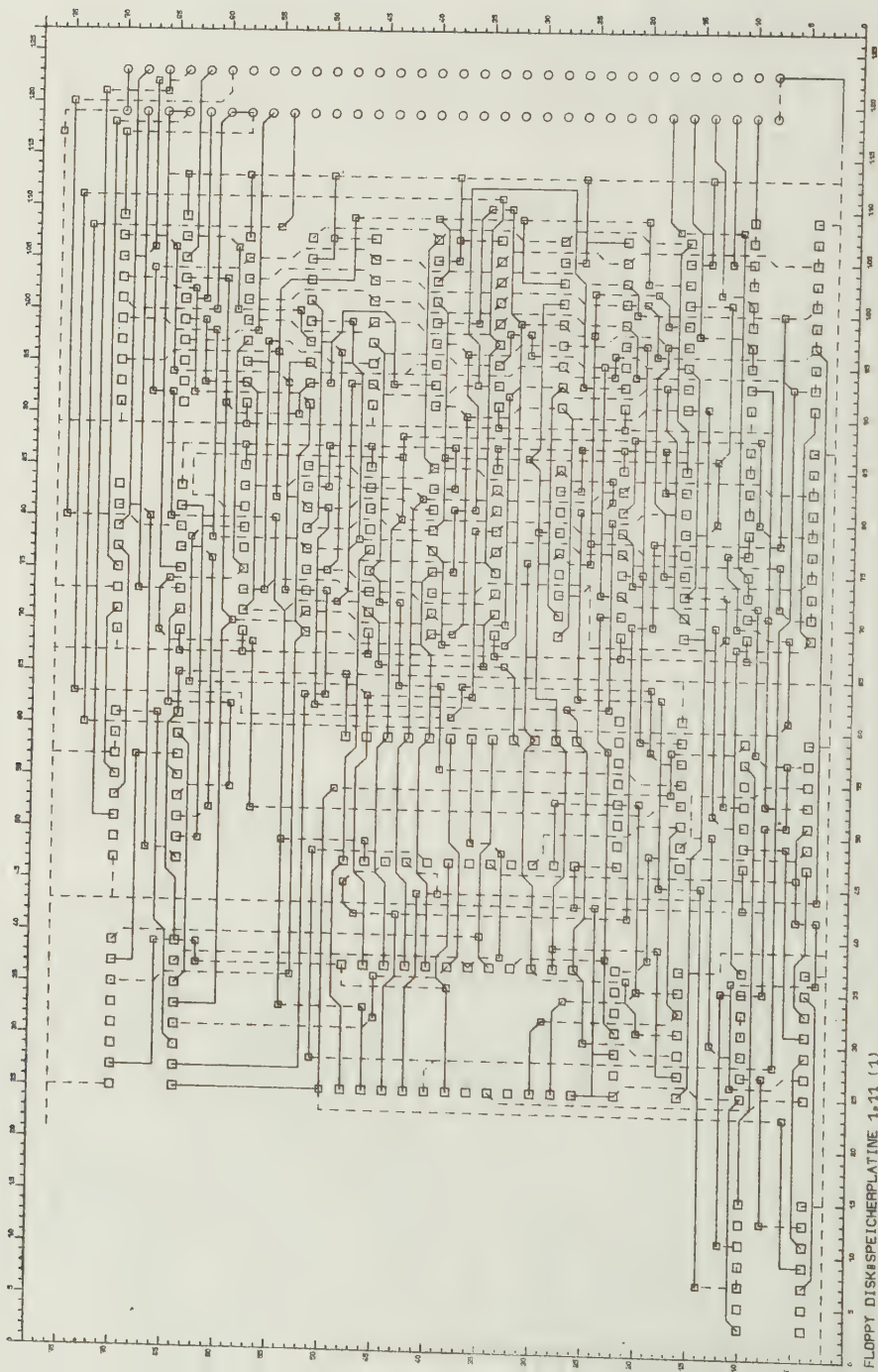
DATUM 16.5.79



A6

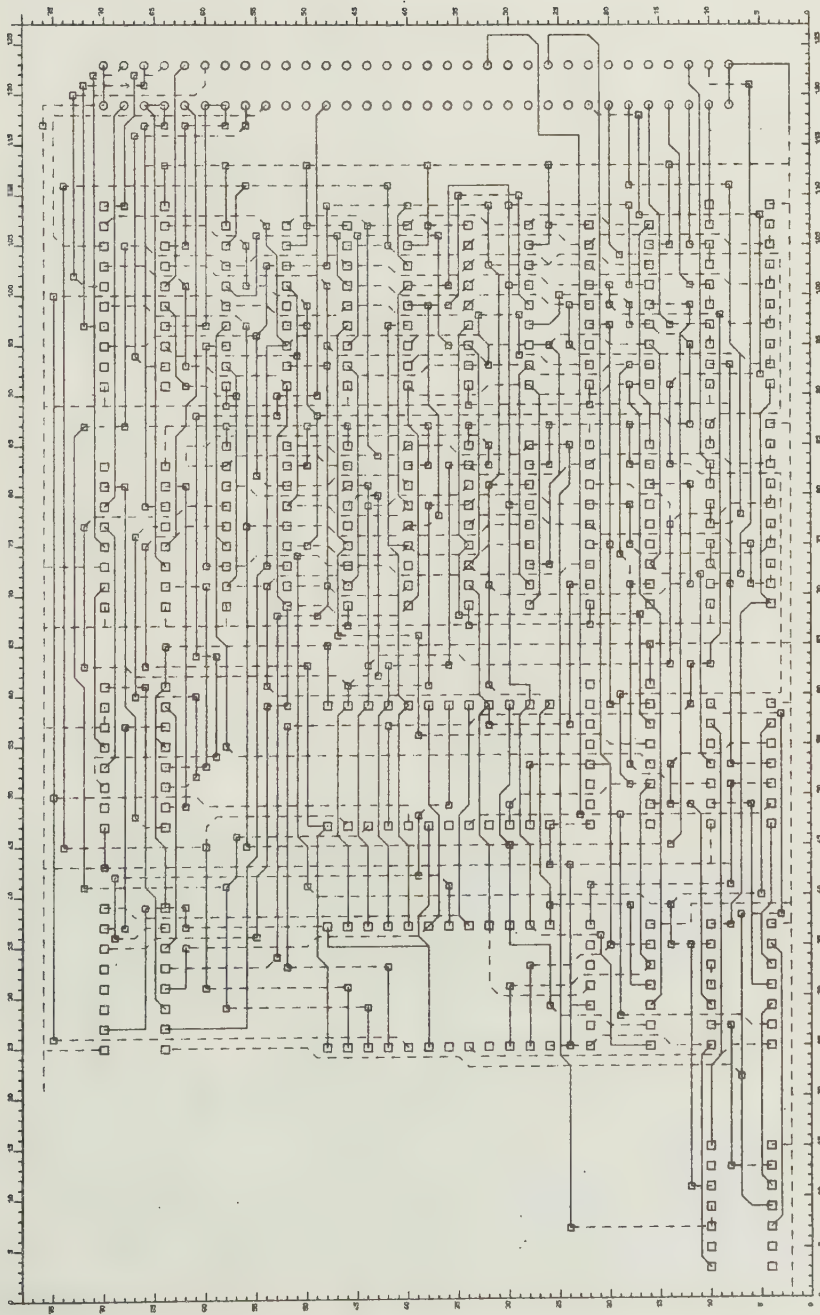






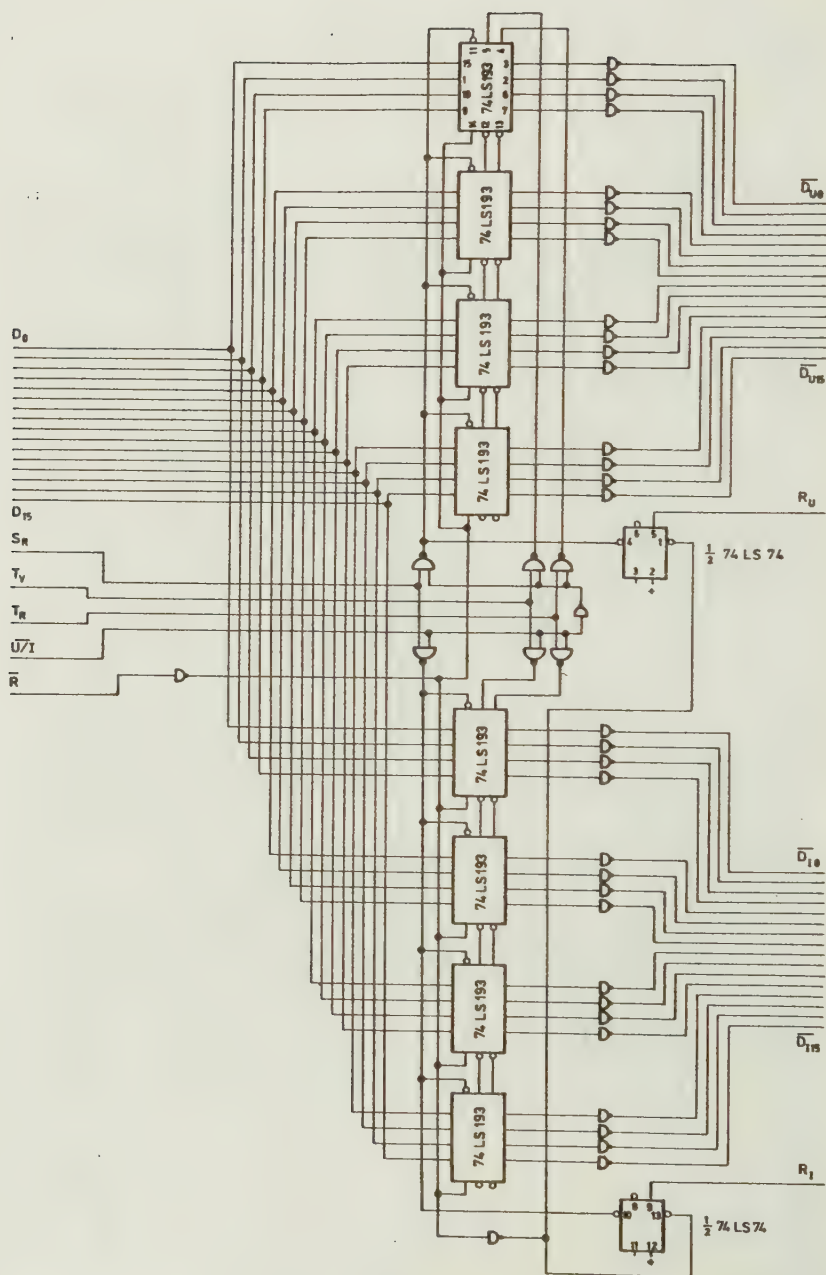
FLOPPY DISK SPEICHERPLATINE 1-11 (1)

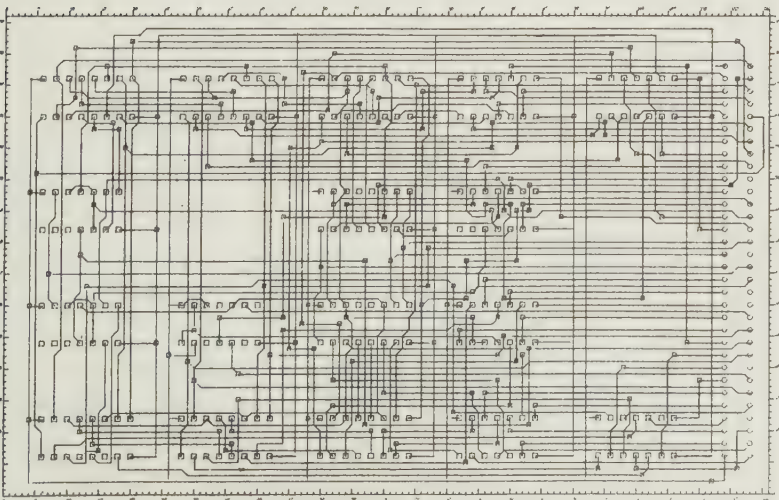
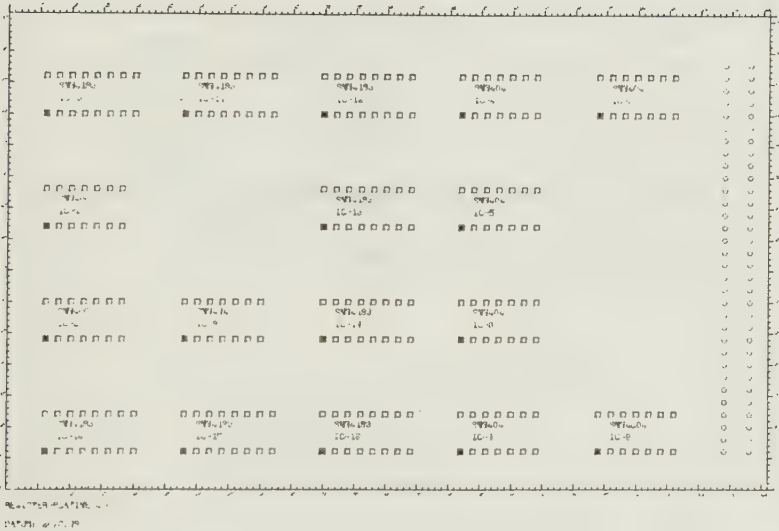
DATUM: 18.5.79



FLOPPY DISK SPEICHER PLATINE 1.11 (2)

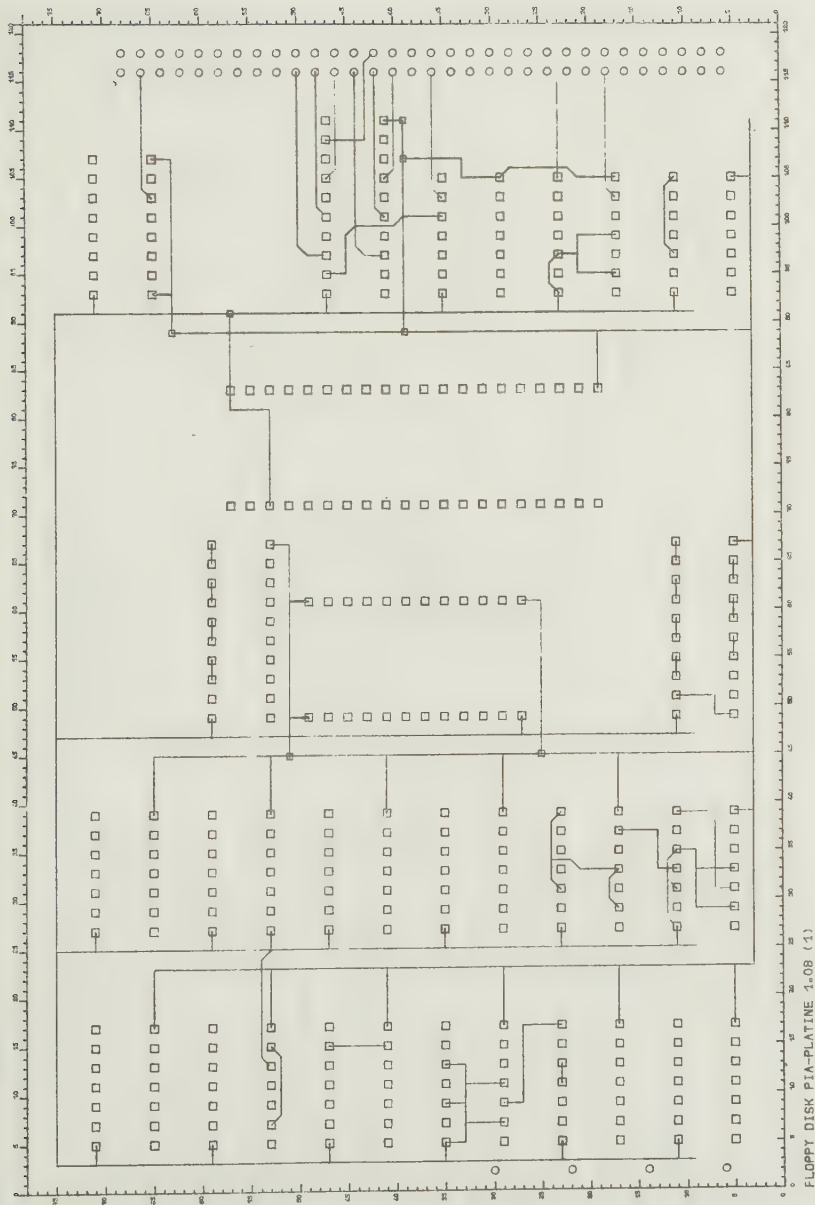
DATUM: 16.5.79

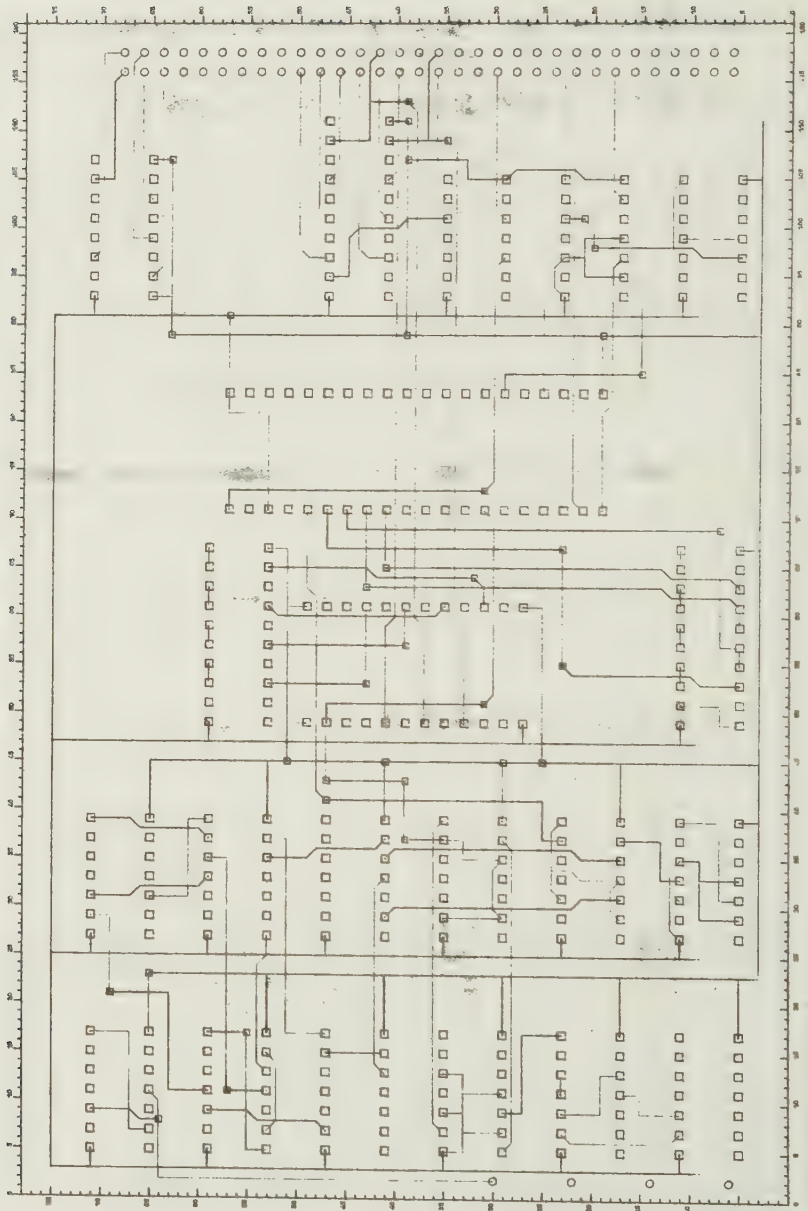




7.3 Entstehen eines Entwurfs
=====

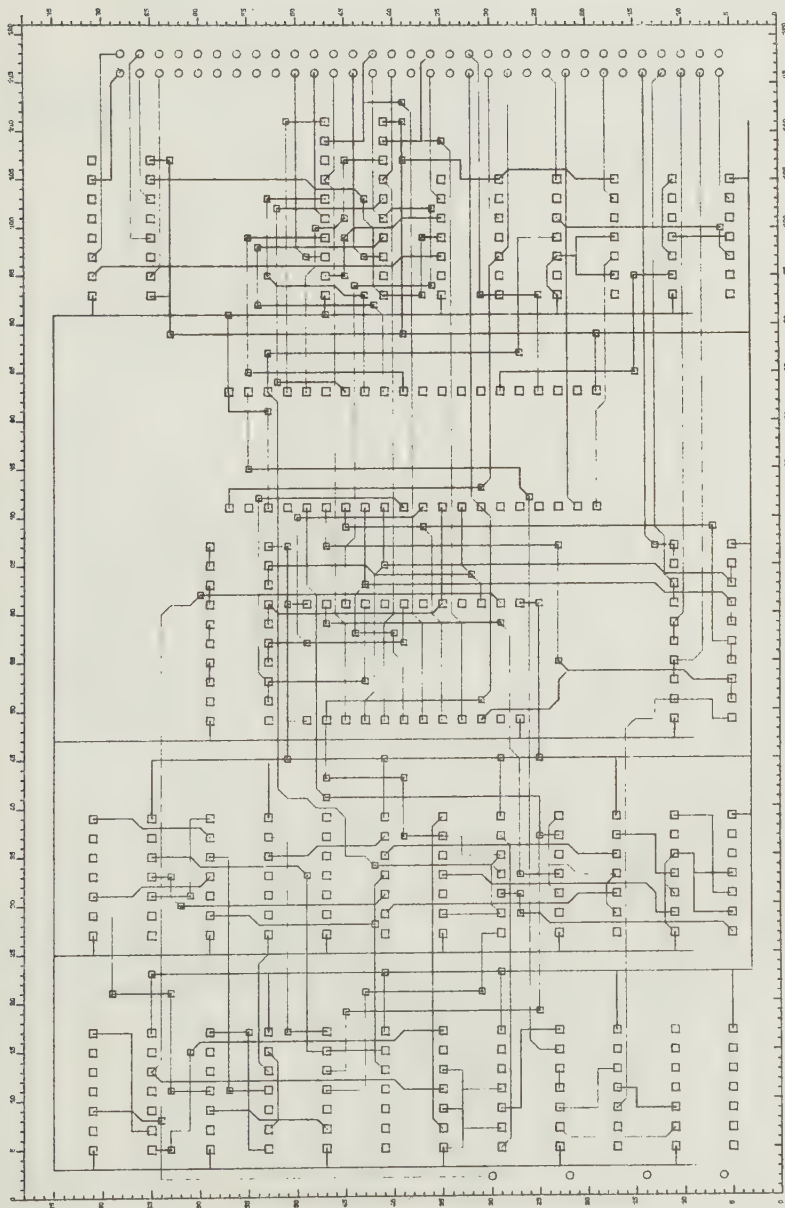
- A13 Anschluß an die Versorgungsleitungen,
 Abbruch nach Weg 50 der Verbindungsliste
- A14 Abbruch nach Weg 100 der Verbindungsliste
- A15 Abbruch nach Weg 150 der Verbindungsliste
- A16 Bearbeitung aller Verbindungen





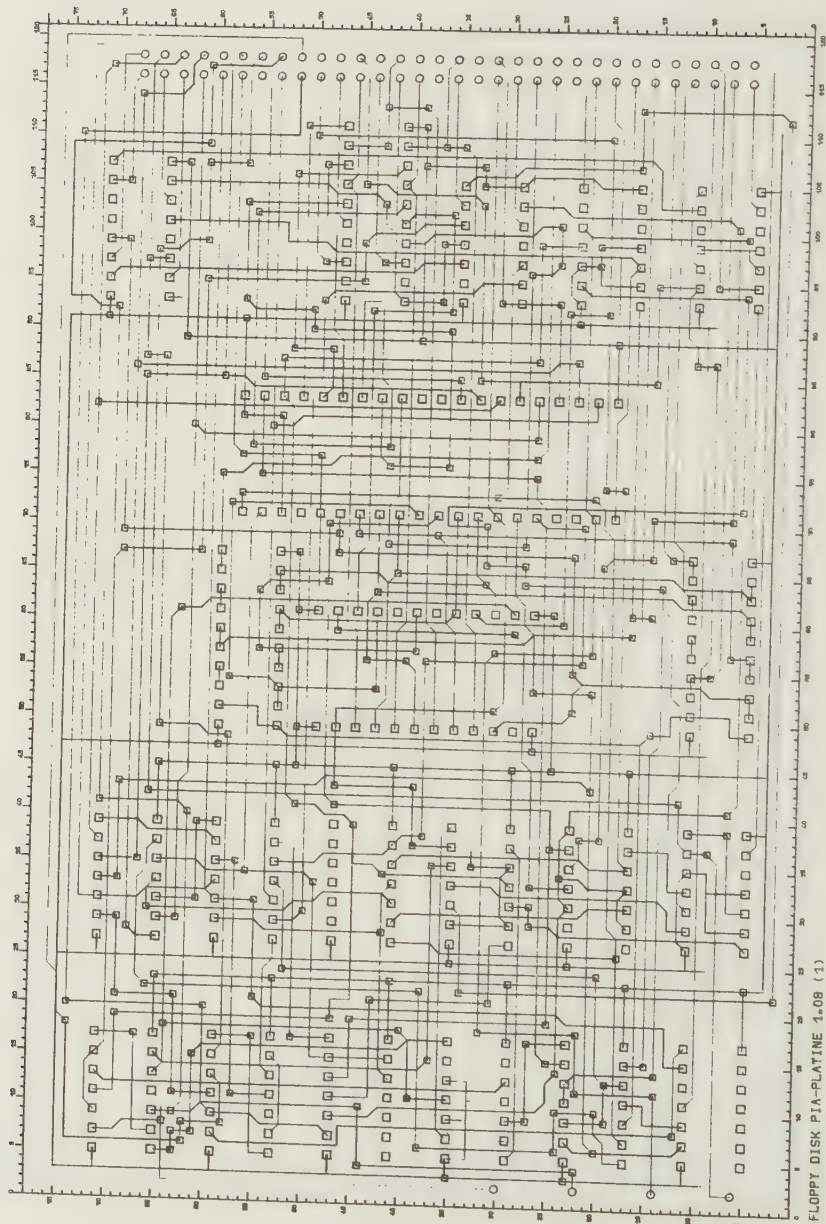
FLOPPY DISK PIA-PLATINE 1.0B (1)

DATUM 3-8-79



FLOPPY DISK PIA-PLATINE 4.08 (1)

DATUM 3-8-79



7.4 Geometriedatei

7.4.1 Syntax und Semantik der Geometriedatei

Die Syntax der Geometriedatei wird in einer modifizierten Backus Naur Notation beschrieben.

$[]^k$ der Klammerinhalt ist k-mal zu wiederholen, mit $k=0,1,2,\dots$

Bei $k=0$ entfällt der Klammerinhalt

{...} Eingestreuter Kommentar

Abkürzungen:

$X, d(X)$ Vorgänger, Verweis	} der Verweis ist ein Index k , der die Zelle als k -ten Nachbarn ihres Vorgängers ausweist
$X', d(X')$ Nachfolger, Verweis	

SD,DD Status für Durchkontaktierung, Durchmesser [mm]

SDK Status für Durchkontaktierung nach Überarbeitung
des Entwurfs

SBA,BA Status für Bauelementanschlüsse, Durchmesser [mm]

SSA,SA Status für Steckeranschlüsse, Durchmesser [mm]

SH,H Status für mechanische Hindernisse, Durchmesser [mm]

1 Leiterbreite

```
<Geometriedatei>:=<M><VERWEISE><HACHFOLGER><GEWICHTE>  
    <RICHTUNGSBEZUG><ERLAUBTE UEBERGAENGE>  
    <NACHBARSCHAFT FUER ANSCHLUSSVERBESSERUNG>  
    <WIRKUNGSQUERSCHNITT><STATUS><MASSE>
```

$$\langle M \rangle ::= \langle N_0 \rangle \quad \{\text{Anzahl der Nachbarn}\}$$
$$\langle \text{VERWEISE} \rangle ::= [\langle \text{INDEX} \rangle \langle \text{DX} \rangle \langle \text{DY} \rangle \langle \text{EBENE} \rangle [\langle \text{POS1} \rangle \langle \text{POS2} \rangle]]^{\langle \text{M} \rangle}$$
$$\langle \text{INDEX} \rangle ::= \langle N \rangle_0 \{ \langle \text{INDEX} \rangle = k \rightarrow \text{es wird der Übergang zum } k\text{-ten Nachbarn beschrieben, } k=1, \dots, \langle M \rangle \}$$

$\langle DX \rangle ::= \langle N \rangle$ {Vektor der Länge $\sqrt{DX^2 + DY^2}$, der den Übergang $X \rightarrow X'$ }
 $\langle DY \rangle ::= \langle N \rangle$ {(X' ist der k.-te Nachbar von X), beschreibt
 $\langle EBENE \rangle ::= 0|1|2$ {Ebene e des Übergangs $X \rightarrow X'$, $e = 0 \rightarrow$ Ebene unbestimmt
 $\langle POS1 \rangle ::= 1|2|5$ {Position in X, die beim Übergang auf X' in
Ebene 1 belegt wird
 $POS1 = 1 \rightarrow$ Position 1
 $POS1 = 2 \rightarrow$ Position 2
 $POS1 = 5 \rightarrow$ Position 1 + 2}

 $\langle N \rangle ::= -3|-2|-1|0|1|2|3$ {für D127-, D635-, DU-Raster}
 $\langle POS2 \rangle ::= 3|4|6$ {Position in X, die beim Übergang auf X' in Ebene 2
belegt wird
 $POS2 = 3 \rightarrow$ Position 3
 $POS2 = 4 \rightarrow$ Position 4
 $POS2 = 6 \rightarrow$ Position 3 + 4
 $\langle POS1 \rangle, \langle POS2 \rangle =$ Blank, falls es nur eine Position
pro Ebene gibt }.

 $\langle NACHFOLGER \rangle ::= [\langle d(X) \rangle \langle ANZ \rangle \langle d(X') \rangle] \langle ANZ \rangle \langle M+1 \rangle$
 $\langle d(X) \rangle ::= \langle N_0 \rangle$
 $\langle d(X') \rangle ::= \langle N_0 \rangle$
 $\langle ANZ \rangle ::= \langle N_0 \rangle$ {Anzahl der Nachfolger eines Punktes X mit Verweisen
 $\langle d(X') \rangle$ }
 $\langle GEWICHTE \rangle ::= [\langle d(X) \rangle \langle ANZ \rangle \langle G \rangle] \langle ANZ \rangle \langle M+1 \rangle$
 $\langle G \rangle ::= 0|1|2|3$ {Gewichtszuwachs für den Übergang $X \rightarrow X'$
Reihenfolge wie bei NACHFOLGER festgelegt
 $G=0 \rightarrow$ Ein Übergang ist nur möglich, wenn er ohne
Ebenenwechsel realisiert werden kann}
 $\langle RICHTUNGSBEZUG \rangle ::= [\langle LAGE \rangle \langle ANZAHL \rangle [\langle IND \rangle] \langle ANZAHL \rangle] 8$
 $\langle LAGE \rangle ::= 1|2|3|4|5|6|7|8$
{ $LAGE = 1 \rightarrow$ 1. Quadrant
2 $\rightarrow$ 4. Quadrant
3 $\rightarrow$ 2. Quadrant
4 $\rightarrow$ 3. Quadrant
5 $\rightarrow$ obere Halbebene
6 $\rightarrow$ untere Halbebene
7 $\rightarrow$ rechte Halbebene
8 $\rightarrow$ linke Halbebene }

$\langle \text{IND} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$ {Erlaubte Indizes bei der Berechnung der Nachfolger
in Abhängigkeit der durch $\langle \text{LAGE} \rangle$ beschriebenen
relativen Lage von Startpunkt und Zielpunkt der
Verbindung.}

$\langle \text{ANZAHL} \rangle ::= N_0$ {Beschränkung der Anzahl der Nachfolger durch die
relative Lage von Startpunkt und Zielpunkt}

$\langle \text{ERLAUBTE UEBERGAENGE} \rangle ::= [\langle d(X') \rangle \langle \text{BX1} \rangle \langle \text{BX2} \rangle \langle \text{BX3} \rangle \langle \text{BX4} \rangle] \langle M \rangle$

$\langle \text{BX1} \rangle ::= 0 | 1 | 2$ {Bei Übergang $X \rightarrow X'$ in Ebene 1 muß bei X

$\langle \text{BX2} \rangle ::= 0 | 1 | 2$ Position BX1, bei X' Position BX2 frei sein.
BX1 = 0 $\rightarrow$ Belegung irrelevant}

$\langle \text{BX3} \rangle ::= 0 | 3 | 4$ {Bei Übergang $X \rightarrow X'$ in Ebene 2 muß Position BX3
in X und BX4 in X' frei sein}

$\langle \text{BX4} \rangle ::= 0 | 3 | 4$

$\langle \text{NACHBARSCHAFT FUER ANSCHLUSSVERBESSERUNG} \rangle ::= \langle \text{AAN} \rangle \langle d(X') \rangle \langle \text{AAN} \rangle$
 {Angabe, ob bei Erreichen eines Zielpunktes die
Nachbarschaft des Zielpunktes durchsucht werden soll}

$\langle \text{Wirkungsquerschnitt} \rangle ::= [\langle \text{EBENE} \rangle \langle R \rangle \langle \text{ANZ} \rangle \langle d(X') \rangle]^4$

$\langle R \rangle ::= 2 | 4 | 1 | 3$ {Es werden die Indizes der Nachbarn einer Zelle x
mit Leiterelement in Richtung $\langle R \rangle$ und Ebene $\langle \text{EBENE} \rangle$
angegeben, die für Durchkontaktierungen zu sperren
sind}

$\langle \text{STATUS} \rangle ::= \langle \text{SD} \rangle \langle \text{SDK} \rangle \langle \text{SBA} \rangle \langle \text{SSA} \rangle \langle \text{SH} \rangle$

$\langle \text{MASSE} \rangle ::= \langle l \rangle \langle \text{DD} \rangle \langle \text{BA} \rangle \langle \text{SA} \rangle \langle \text{H} \rangle$

$\langle N_0 \rangle ::= N_0$ {ganze positive Zahl}

$\langle F \rangle ::= R^+$ {positive Dezimalzahl}

$\langle \text{AAN} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle \text{SD} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle \text{SDK} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle \text{SBA} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle \text{SSA} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle \text{SH} \rangle ::= \langle N_0 \rangle$

$\langle l \rangle ::= \langle F \rangle$

$\langle \text{DD} \rangle ::= \langle F \rangle$

$\langle \text{BA} \rangle ::= \langle F \rangle$

$\langle \text{SA} \rangle ::= \langle F \rangle$

$\langle \text{H} \rangle ::= \langle F \rangle$

7.4.2 Geometriedatei für D127-Raster

```

10  DATUM DER FÜR RASTERGITTERWEITE 1.27 MM
20  DATABLATT: D127-Raster
30  DATABLATT: D127-Raster
700  DATUM: 1.1.1980, 1.1.1980, 1.1.1980
710  ***ANZAHL DER NACHBARN: N ****
720  8
730  ***VERSCHIEBUNGSVEKTOREN FÜR DIE NACHFOLGER ****
740  1 2 0 2
750  2 0 2 1
760  3 -2 0 2
770  4 0 -2 1
780  5 1 1 0
790  6 -1 1 0
800  7 -1 -1 0
810  8 1 -1 0
820  ***NACHFOLGER: D(X) ANZ D(X'),.....
830  0 2 2 4 1 3 5 6 7 8
840  1 5 1 5 8 2 4
850  2 5 2 5 6 1 3
860  3 5 3 6 7 2 4
870  4 5 4 7 8 1 3
880  5 2 1 2
890  6 2 2 3
900  7 2 3 4
910  8 2 1 4
920  ***GEWICHTE: D(X) ANZ G,.....
930  0 8 1 1 1 1 1 1 1 1
940  1 5 1 2 2 3 2
950  2 5 1 2 2 3 3
960  3 5 1 2 2 3 3
970  4 5 1 2 2 3 3
980  5 2 2 2
990  6 2 2 2
1000  7 2 2 2
1010  8 2 2 2
1020  ***RICHTUNGSBEZUG: LAGE ANZAHL D(X),...
1030  1 4 0 1 2 5
1040  2 4 0 1 4 8
1050  3 4 0 3 6 2
1060  4 4 0 3 4 7
1070  5 6 0 1 2 3 5 6
1080  6 6 0 1 3 4 7 8
1090  7 6 0 1 2 4 5 8
1100  8 6 0 2 3 4 6 7
1110  ***ERLAUBTE UEBERGÄNGE: D(X) BX1 BX2 BX3 BX4 ****
1120  1 3 3
1130  2 1 1
1140  3 3 3
1150  4 1 1
1160  5 1 1 3 3
1170  6 1 1 3 3
1180  7 1 1 3 3
1190  8 1 1 3 3
1230  ***NACHBARSCHAFT FÜR ANSCHLUSSVERBESSERUNG: ANZ D(X'),...
1240  4 5 6 7 8
1250  ***WIRKUNGSÜBERSCHNITT FÜR LEITERELEMENTE:
1260  ***EBENE ANZ D(X'),.....
1270  1 2 0
1280  1 4 0
1290  2 1 0
1300  2 3 0
1310  ***STATUS: CD SDB SBA SSA SH
1320  3 4 5 6 7
1330  ***MASSE: L DD BA SA H
1340  0.30 1.2 1.3 1.3 1.3

```

```

10 0=DATEI: GPO FUER DU-RASTER (VARIABLE RASTERGITTERWEITE)
20 0=*****
50 0=IDIVEL.,GEODU,N14(PLE031),-STD-,MD=-STD-,PROT.,=A
700 0=DATEI:R,FALLUION,GROENDEINT.,R,I.,=/
710 0=ANZAHL DER NACHBARI M *****
720 40
730

```

```

730 ***VERWEISE: D(X) DX DY EBENE POS 1 POS 2 *****

```

```

742 1 3 0 2 0 3
743 2 0 3 1 1 0
744 3 -3 0 2 0 3
745 4 0 -3 1 1 0
746 5 1 1 0 2 3
747 6 -1 1 0 1 3
748 7 -1 -1 0 1 4
749 8 1 -1 0 2 4
750 9 2 1 0 5 4
751 10 -1 1 0 2 4
752 11 -1 -2 0 2 6
753 12 2 -2 0 5 6
754 13 1 1 0 1 6
755 14 -2 1 0 3 6
756 15 -2 -2 0 5 6
757 16 1 -2 0 1 6
758 17 2 2 0 5 6
759 18 -1 2 0 2 6
760 19 -1 -1 0 2 3
761 20 2 -1 0 5 3
762 21 1 2 0 1 3
763 22 -2 2 0 5 6
764 23 -2 -1 0 5 3
765 24 1 -1 0 1 3
766 25 3 0 2 2 4
767 26 0 3 1 2 4
768 27 -3 0 2 2 4
769 28 0 -3 1 2 4
771 29 3 0 2 1 4
772 30 0 3 1 1 4
773 31 -3 0 2 1 4
774 32 0 -3 1 1 4
775 33 3 0 2 1 3
776 34 0 3 2 2 3
777 35 -3 0 2 2 3
778 36 0 -3 2 2 3
779 37 0 0 2 1 3
780 38 0 3 1 1 3
781 39 -3 0 2 1 3
782 40 0 -3 1 1 3

```

```

820 ***NACHFOLGER: D(X) ANZ D(X)1,.....*****

```

```

830 0 8 2 4 1 5 6 7 8
832 1 5 1 5 8 2 4
833 2 5 2 6 5 3 1
834 3 5 3 7 6 2 4
835 4 5 4 8 7 3 1
836 5 2 33 34 17
837 6 2 38 39 22
838 7 2 31 32 15
839 8 2 25 28 14
840 9 2 1 2
841 10 2 2 3
842 11 2 3 4
843 12 2 4 1
844 13 2 1 2
845 14 2 2 3
846 15 2 3 4
847 16 2 4 1
848 17 2 1 2
849 18 2 2 3
850 19 2 3 4
851 20 2 4 1
852 21 2 1 2
853 22 2 2 3
854 23 2 3 4
855 24 2 4 1
856 25 3 25 9 12
857 26 3 26 9 10
858 27 3 27 10 11
859 28 3 28 11 12
860 29 3 29 13 16
861 30 3 30 13 14
862 31 3 31 14 13
863 32 3 32 15 16
864 33 3 33 17 20
865 34 3 34 17 18
866 35 3 35 18 19
867 36 3 36 19 20
868 37 3 37 21 24
869 38 3 38 21 22
870 39 3 39 22 23
871 40 3 40 23 24

```

```

920 ***GEWICHTE: D(X) ANZ G,.....*****

```

```

930 0 8 1 1 1 1 1 1 1
932 1 5 1 2 2 3 3
933 2 5 1 2 2 3 3
934 3 5 1 2 2 3 3
935 4 5 1 2 2 3 3
936 5 2 0 0 2
937 6 2 0 0 2
938 7 2 0 0 2
939 8 2 0 0 2
940 9 2 0 0
941 10 2 0 0
942 11 2 0 0
943 12 2 0 0
944 13 2 0 0
945 14 2 0 0
946 15 2 0 0
947 16 2 0 0
948 17 2 0 0
949 18 2 0 0
950 19 2 0 0
951 20 2 0 0
952 21 2 0 0
953 22 2 0 0
954 23 2 0 0

```

```

956 25 3 1 2 2
957 26 3 1 2 2
958 27 3 1 2 2
959 28 3 1 2 2
960 29 3 1 2 2
961 30 3 1 2 2
962 31 3 1 2 2
963 32 3 1 2 2
964 33 3 1 2 2
965 34 3 1 2 2
966 35 3 1 2 2
967 36 3 1 2 2
968 37 3 1 2 2
969 38 3 1 2 2
970 39 3 1 2 2
971 40 3 1 2 2
1020 ***RICHTUNGSBEZUG: LAGE ANZAHL D(X),...*****
1032 1 16 0 1 2 5 25 29 33 37 26 30 34 38 9 13 17 21
1033 2 16 0 1 4 8 25 29 33 37 28 32 36 40 12 16 20 24
1034 3 16 0 3 6 2 27 31 35 39 26 30 34 38 10 14 18 22
1035 4 16 0 3 4 7 27 31 35 39 28 32 36 40 11 15 19 23
1036 5 27 0 1 2 3 5 6 25 29 33 37 26 30 34 38 27 31 35 39 9 13 17 21 10 14 18 22
1037 6 27 0 1 3 4 7 8 25 27 28 29 31 32 33 35 36 37 39 40 11 12 15 16 19 20 23 24
1038 7 27 0 1 2 4 5 8 25 26 28 29 30 32 33 34 36 37 38 40 9 12 13 16 17 20 21 24
1039 8 27 0 2 3 4 6 7 26 27 28 30 31 32 34 35 36 38 39 40 10 11 14 15 18 19 22 23
1110 ***ERLAUBTE UEBERGAENGE: D(X) BX1 BX2 BX3 BX4 *****
1121 1 3 3
1122 2 1 1 3 3
1123 3 3 3
1124 4 1 1 3 3
1125 5 1 2 3 3
1126 6 1 1 3 3
1127 7 1 1 3 4
1128 8 1 2 3 4
1129 9 1 1 0 3
1130 10 0 1 0 3
1131 11 0 1 3 3
1132 12 1 1 3 3
1133 13 0 1 0 3
1134 14 2 1 0 3
1135 15 2 1 3 3
1136 16 0 1 3 3
1137 17 1 1 4 3
1138 18 0 1 4 3
1139 19 0 1 0 3
1140 20 1 1 0 3
1141 21 0 1 4 3
1142 22 2 1 4 3
1143 23 2 1 0 3
1144 24 0 1 0 3
1145 25 4 4
1146 26 2 2 4 4
1147 27 4 4
1148 28 2 2 4 4
1149 29 4 4
1150 30 1 1 4 4
1151 31 1 4 4
1152 32 1 1 3 3
1153 33 3 3
1154 34 2 2 3 3
1155 35 3 3
1156 36 2 2 3 3
1157 37 3 3
1158 38 1 1 3 3
1159 39 3 3
1160 40 1 1
1230 *** NACHBARSCHAFT FLER ANSCHLUSSVERBESSERUNG: ANZ D(X'),...*****
1240 0
1250 *** WIRKUNGSQUERSCHNITT FUER LEITERELEMENTE:*****
1260 *** EBENE ANZ D(X')*****
1270 1 2 0
1280 1 4 0
1290 2 1 0
1300 2 3 0
1310 *** STATUS: SD SDK SBA SSA SH *****
1320 16 17 18 19 31
1330 *** MASSE: L DD BA SA H *****
1340 0,25 1,1 1,3 1,3 1,3 *****

```

Lebenslauf =====

Am 14. 6.1940 wurde ich, Helga Weber, in Berlin als Tochter der Eheleute Werner Rubach und Anneliese Rubach, geb. Rothmann geboren.

1959 legte ich die Reifeprüfung am Realgymnasium Max-Josef-Stift in München ab und begann mit dem Studium der Physik an der Technischen Hochschule in München.

Nach Abschluß des Studiums im Jahr 1964 mit dem akademischen Grad einer Diplom-Physikerin trat ich in das Fachgebiet Richtfunk der Firma AEG-Telefunken in Backnang ein. Im Jahr 1967 wechselte ich zum Rechenzentrum von AEG-Telefunken in Backnang über und arbeitete dort als Laborleiterin und später Laborgruppenleiterin bis 1976 auf dem Gebiet "Entwicklungsautomatisierung".

Seit 1976 bin ich wissenschaftliche Mitarbeiterin an der Universität Erlangen-Nürnberg.

Ich bin seit 1963 mit Dr. Herbert Weber verheiratet und habe zwei Kinder (Claudia *1965 und Nathalie *1970).

HARRY BUNSCHE
offsetdruck
8521 BUBENREUTH